



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# **Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele**

Uurimustöö 1.1-4/12/347 / Lep12183 II etapi lõpparuanne

**Tallinn 2014**

Uurimustöö täitjad:

Ivo Palu	dotsent, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika instituut
Jelena Šuvalova	vanemteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tanel Sarnet	nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Triin Kangro	nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Jaan Niitsoo	assistent, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tarmo Rähmonen	laborant, TTÜ elektroenergeetika instituut
Elsa Lepp	laborant, TTÜ elektroenergeetika instituut
Mari Löper	laborant, TTÜ elektroenergeetika instituut
Jako Kilter	elektrisüsteemi ekspert, Elektertranspordi R&D projekti juht, Elering AS
Mart Landsberg	elektrivõrgu planeerimise osakonna juhataja, Elering AS

# SISUKORD

Uurimustöö II etapi lühikokkuvõte ja kaalukamad järeldused.....	19
Uurimustöö teise etapi lõpparuande ülevaade.....	21
1. Elektriautode laadimise mõju elektrivõrgule .....	23
1.1 Elektriautode põhjustatav pingelang .....	23
1.2 Elektriautode põhjustatav pingete asümmeetria .....	24
1.3 Elektriautode põhjustatavad kõrgemad harmoonikud .....	24
1.4 Modelleerimises kasutatavad elektriautod.....	26
1.5 Elektrivõrgu kirjeldus .....	29
1.5.1 TTÜ ülikoolilinnaku elektrivõrk .....	29
1.5.2 TTÜ 6 kV toitevõrgu kirjeldus.....	30
1.5.3 TTÜ 35 kV ja 110 kV toitevõrgu kirjeldus .....	31
1.5.4 Lihtne elektrivõrk.....	32
1.6 Elektriautode modelleerimine tarkvaraga DIgSILENT.....	33
1.6.1 Võimsusvood TTÜ ülikoolilinnakus .....	35
1.6.2 Võimsusvood lihtsas võrgus.....	37
1.7 Elektriautode koormuse modelleerimine tarkvaraga DIgSILENT arvestades laadimisvoolu kuju .....	38
1.7.1 Pingemoonutused elektriautodest TTÜ ülikoolilinnakus.....	38
1.7.2 Kõrgemad harmoonikud elektriautodest TTÜ ülikoolilinnakus .....	40
1.7.3 Pingemoonutused elektriautodest lihtsas võrgus.....	46
1.7.4 Kõrgemad harmoonikud elektriautodest lihtsas võrgus .....	47
1.8 Kokkuvõte .....	48
1.9 Kirjandus .....	49
2. Ülekandevõrgus toimuvate katkestuste mõju elektriautode laadimistsüklile.....	52
2.1 Elektriauto ühendusviisid ja laadimise moodused.....	52
2.2 Lühiste olemus ja tekkepõhjused.....	55
2.3 Katseseadme põhimõte .....	58
2.4 Toitekatkestuse mõju elektriauto laadimistsüklile .....	60
2.5 Kokkuvõte .....	65
2.6 Kirjandus .....	66
3. Elektriraudtee süsteemid .....	67
3.1 Üldist .....	67
3.2 Kontaktvõrkude süsteemid .....	74
3.3 Kontaktvõrkude lahendused maailmas .....	75

3.3.1	Hispaania 1x25 kV 50 Hz .....	75
3.3.2	Jaapan 2x25 kV 50 Hz .....	76
3.3.3	Itaalia 2x25 kV 50 Hz .....	78
3.3.4	Hiiina 3/2 + 2x25 kV 50 Hz .....	82
3.3.5	Korea 3/2 + 2x25 kV 50 Hz .....	84
3.3.6	Soome 1x25 kV ja 2x25 kV 50 Hz .....	85
3.4	1x25 kV ja 2x25 kV süsteemide võrdlus .....	85
3.5	Elektriraudtee süsteemides kasutatavad trafod .....	86
3.6	Kontaktliinide auto- ja lisapingetrafod .....	90
3.7	Kokkuvõte .....	92
3.8	Kirjandus .....	93
4.	Kontaktvõrkude mõju elektri kvaliteedile .....	97
4.1	Üldist .....	97
4.2	Pinge asümmeetria .....	98
4.3	Toitepinge harmoonikud .....	103
4.4	Elektriraudtee regeneratiivse pidurdussüsteemi mõju ülekandevõrgule .....	114
4.5	Ebaühtlane kontakt pantograafi ja kontaktliini vahel .....	115
4.6	Kokkuvõte .....	116
4.7	Kirjandus .....	118
5.	Elektriraudtee vedurid .....	121
5.1	Vedurite tüübid .....	121
5.1.1	Takistitel põhinev ajam .....	124
5.1.2	Dioodalaldid .....	125
5.1.3	Türistor inverterid .....	125
5.1.4	Transistor inverter .....	126
5.2	Vedurite karakteristikud .....	127
5.3	Vedurite matemaatiline modelleerimine .....	133
5.3.1	Lineaarne mudel .....	134
5.3.2	Näivtakistuse või juhtivuse mudel .....	134
5.3.3	Voolu mudel .....	134
5.3.4	Võimsuse mudel .....	135
5.4	Kokkuvõte .....	135
5.5	Kirjandus .....	137
6.	Ülekandevõrgu, kontaktliini ja elektrirongide modelleerimine .....	139
6.1	Eesti elektrisüsteemi 110 kV võrgu modelleerimine .....	139

6.1.1	Modelleeritud 110 kV ülekandevõrgu ekvivalendid .....	141
6.1.2	Modelleeritud elektrivõrgu ülekandeliinid .....	142
6.1.3	Ülekandevõrgu trafode mudelid .....	145
6.1.4	Ülekandevõrgu koormusmudelid .....	147
6.2	Elektriraudtee kontaktvõrkude modelleerimine .....	148
6.2.1	Raudtee veotrafod .....	148
6.2.2	Kontaktliini modelleerimine .....	154
6.2.3	Kontaktvõrgu PSCAD mudeli koostamine .....	162
6.3	Elektrirongide veosüsteemide modelleerimine .....	165
6.3.1	Mudelite kirjeldus .....	165
6.3.2	PSCAD mudeli parameetrite arvutamine .....	171
6.4	Kokkuvõte .....	178
6.5	Kirjandus .....	181
7.	Elektriraudtee mõjude hinnang 110 kV ülekandevõrgule .....	184
7.1	Liitumispunktideks sobivate alajaamade määratlemine .....	184
7.1.1	Geograafiline analüüs .....	184
7.1.2	Teoreetiline pingesümmeetria analüüs .....	191
7.1.3	Elektriliinide ülekandevõimsuse analüüs .....	205
7.2	Elektriraudtee koormusest põhjustatud pingesümmeetria hinnang .....	215
7.2.1	Simulatsioonide tulemused Harjumaa sõlmajaamades .....	219
7.2.2	Simulatsioonide tulemused Raplamaa sõlmajaamades .....	235
7.2.3	Simulatsioonide tulemused Pärnumaa sõlmajaamades .....	245
7.3	Kokkuvõte .....	260
	Kokkuvõte .....	264
	Täiendavad tööd kolmandal aastal .....	266
	Lisa 1 PSCAD mudeli ülevaade .....	268

Joonis 1.1. Laadimisvool võrrelduna suhtelise laadimisajaga [17]	25
Joonis 1.2. Voolumoonutus võrrelduna suhtelise laadimisajaga [17]	25
Joonis 1.3. Toitepinge ja voolu siinuskõver elektriauto laadimise ajal	27
Joonis 1.4. Elektriauto laadimisvoolu moonutus harmoonikute kaupa.	27
Joonis 1.5. Elektriauto aku laadimisvool ja voolu moonutust hindav tegur THD	28
Joonis 1.6. Elektriauto aku laadimisprotsessi võimsused	28
Joonis 1.7. Mustamäe-Õismäe võrguskeem	30
Joonis 1.8. Tallinna 35 kV võrgu osa, AJ TPI 35/6 toide	32
Joonis 1.9. TTÜ ülikoolilinnaku võrgu ülekandevõrgupoolne osa	33
Joonis 1.10. TTÜ ülikoolilinnaku võrgu jaotusvõrgupoolne osa	34
Joonis 1.11. Lihtsa elektrivõrgu skeem	37
Joonis 1.12. Paaritud kõrgemad harmoonikud esimese variandi korral	40
Joonis 1.13. Paaritud kõrgemad harmoonikud teise variandi korral	41
Joonis 1.14. Paaritud kõrgemad harmoonikud kolmanda variandi korral	41
Joonis 1.15. Paaritud kõrgemad harmoonikud neljanda variandi korral	42
Joonis 1.16. Paaritud kõrgemad harmoonikud viienda variandi korral	43
Joonis 1.17. Paaritud kõrgemad harmoonikud viienda variandi korral 6 kV võrgus	43
Joonis 1.18. Paaritud kõrgemad harmoonikud viienda variandi korral 35 kV võrgus	44
Joonis 1.19. Paaritud kõrgemad harmoonikud kuuenda variandi korral	44
Joonis 1.20. Paaritud kõrgemad harmoonikud viienda variandi korral 6 kV võrgus	45
Joonis 1.21. Pinge harmoonikud Energeetikamaja alajaama (AJ 784) 0,4 kV latil	45
Joonis 1.22. Pinge harmoonikud Energeetikamaja alajaama (AJ 784) 6 kV latil	46
Joonis 1.23. Paaritud kõrgemad harmoonikud esimese variandi korral lihtsas võrgus	47
Joonis 1.24. Paaritud kõrgemad harmoonikud teise variandi korral lihtsas võrgus	48
Joonis 2.1. Laadimiseks kasutatavate seadmete ja ühenduste põhimõtteskeem [1]	53

Joonis 2.2. Näidis induktiivlaadimissüsteemist [4]	54
Joonis 2.3. 110 kV ülekandeliinide rikete arv tekkepõhjuste kaupa aastatel 2005-2009 [3]	57
Joonis 2.4. Ülekandevõrgus toimunud lühise mõju pingele mõõdetuna 0,4 kV elektrivõrgus	57
Joonis 2.5. Katseseadme esialgne loogikaskeem	59
Joonis 2.6. Katseseadme skeem	59
Joonis 2.7. Mõõteseadmed, katseseade ja elektriauto TTÜ laboris	60
Joonis 2.8. Toitekatkestuse kestvus (0,233 sekundit) ja pinge amplituudväärtused	60
Joonis 2.9. Toitekatkestuse kestvus (0,445 sekundit) ja pinge amplituudväärtused	61
Joonis 2.10. Pinge ja voolu keskvaartused 0,233 sekundilise lühise korral mõõdetuna laadija klemmidel	61
Joonis 2.11. Pinge ja voolu keskvaartused 0,233 sekundilise lühise korral mõõdetuna toitevõrgust	62
Joonis 2.12. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse keskvaartused 0,233 sekundilise lühise korral	62
Joonis 2.13. Pinge ja voolu THD väärtused 0,233 sekundilise katkestuse korral.	63
Joonis 2.14. Pinge ja voolu keskvaartused 0,445 sekundilise lühise korral mõõdetuna laadija klemmidel	63
Joonis 2.15. Pinge ja voolu keskvaartused 0,445 sekundilise lühise korral mõõdetuna toitevõrgust	64
Joonis 2.16. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse keskvaartused 0,445 sekundilise lühise korral	64
Joonis 2.17. Pinge ja voolu THD väärtused 0,445 sekundilise katkestuse korral.	65
Joonis 3.1. Kavandatav Rail Balticu raudteetrass on üheks osaks Euroopa Liidu transpordi- infrastruktuuri TEN-T võrgustikust [1]	68
Joonis 3.2. Raudteeliin Tallinn – Pärnu – Riia – Panevezys – Kaunas – Varssavi [3]	70
Joonis 3.3. Elektriraudtee kontaktvõrkude nimipinged Euroopas [4]	72
Joonis 3.4. 3-faasilise raudteevagun, mis saavutas 1903. aastal Saksamaal kiiruse 213 km/h [4]	73
Joonis 3.5. Kontaktliini konstruktsioonitüüp Re250 [8]	75
Joonis 3.6. Jaapani AC struktuurskeem [8]	76

Joonis 3.7. Koaksiaalkaabliga toitesüsteem [8]	77
Joonis 3.8. Kasutusel olevad konstruktsioonid kontaktliinidel [8]	78
Joonis 3.9. Kontaktvõrgu ühendusskeem ülekandevõrguga ja alajaama skeem [12]	79
Joonis 3.10. Veotrafo elektriskeem (lisatud on mahtuvus, arvestamiseks trafo sisemiste mahtuvuslike mõjudega) [10]	79
Joonis 3.11. Itaalia kontaktvõrgu konfiguratsioon [11]	80
Joonis 3.12. Juhtide geomeetriline paiknemine: FD – abitoitejuhe; RW – tagasivoolujuhe; M – kandejuhe; CW – kontaktjuhe; R – relss; GW – maandusjuhe [11]	80
Joonis 3.13. Tüüpilised kasutusel olevad juhtide ristlõiked ja vahekaugused AT süsteemis kaheerõõpmelisel raudteel [14]	81
Joonis 3.14. Relsi ja maandusjuhi ühendusskeem [11]	81
Joonis 3.15. S-ühenduse skeem [10]	81
Joonis 3.16. V-ühendusega trafode mudel [18]	82
Joonis 3.17. Veoalajaama skeem [19]	83
Joonis 3.18. Autotrafo punkti skeem [19]	83
Joonis 3.19. Korea elektriraudtee süsteem [21]	84
Joonis 3.20. Kontaktliini juhtide paiknemine Korea elektriraudtee liinil [21]	84
Joonis 3.21. Soome elektriraudtee 2x25 kV süsteemi toiteskeem ülekandevõrgust [22]	85
Joonis 3.22. 1-faasilise trafo ühendusskeem [18]	86
Joonis 3.23. Scott-trafo ühendusskeem [7]	87
Joonis 3.24. V-ühendusega trafo ühendusskeem [18]	88
Joonis 3.25. Tasakaalustatud trafo ühendusskeem [28]	88
Joonis 3.26. Woodbridge trafo ühendusskeem [7]	89
Joonis 3.27. AT süsteem [8]	90
Joonis 3.28. BT süsteem [7]	91
Joonis 4.1. Pinge ja voolu vektordiagrammid liitumispunktis sümmeetrilise ning elektriraudtee poolt põhjustatud asümmeetrilise koormuse järgselt [12]	100



Joonis 4.2. Arvutuslik $k_u$ sõltuvusena lühisvõimsusest $S'_{sc}$ Kainuus [9]	101
Joonis 4.3. Arvutuslik $k_u$ sõltuvusena lühisvõimsusest $S'_{sc}$ Helsingis [9]	101
Joonis 4.4. Pinge asümmeetria mõõdetulemus Korea Gyongbu kiirraudteeliini PyongTaek alajaamas [13]	102
Joonis 4.5. Pinge asümmeetria mõõdetulemus Korea Gyongbu kiirraudteeliini OkChun alajaamas [13]	102
Joonis 4.6. Pinge asümmeetria mõõdetulemus Korea Gyongbu kiirraudteeliini KimChun alajaamas [13]	103
Joonis 4.7. Kiirraudtee liitumispunktis mõõdetud harmoonmoonutusteguri maksimaalsed- ja hetkväärtused ühe rongi korra [15]	105
Joonis 4.8. Kiirraudtee liitumispunktis mõõdetud harmoonmoonutusteguri maksimaalsed- ja hetkväärtused kahe rongi korral [15]	106
Joonis 4.9. Kolmanda vooluharmoniku amplituudväärtused mõõdetud Scott-trafo primaarpoolel [20]	108
Joonis 4.10. Pantograafi pinge spekter Itaalia juhtumil, kus graafikul a) on esitatud mõõdetav sagedusvahemik 0-1000 Hz ning graafikul b) 1-8 kHz [22]	110
Joonis 4.11. Pantograafi voolu spekter Itaalia juhtumil, kus graafikul a) on esitatud mõõdetav sagedusvahemik 0-1000 Hz ning graafikul b) 1-8 kHz [22]	110
Joonis 4.12. Pantograafi pinge spekter Prantsusmaa juhtumil, kus graafikul a) on esitatud mõõdetav sagedusvahemik 0-1000Hz ning graafikul b) 1-8kHz [22]	111
Joonis 4.13. Pantograafi voolu spekter Prantsusmaa juhtumil, kus graafikul a) on esitatud mõõdetav sagedusvahemik 0-1000Hz ning graafikul b) 1-8kHz [22]	111
Joonis 4.14. Pinge ja koormusvoolu kuju kaarleegi poolt tekitatud häiringu korral [29]	116
Joonis 5.1. Esimene elektriraudtee katserong, Berliin 1879 a [1].	121
Joonis 5.2. Kaasaegsete vedurite rataste asetus [7]	122
Joonis 5.3. Varasemate vedurite rataste asetus [7]	123
Joonis 5.4. Erinevate kontaktvõrgu süsteemide ja vedurite põhimõttelised skeemid [1]	124
Joonis 5.5. Dioodalaldi põhimõtteskeem [1]	125

Joonis 5.6. Türistor inverteri põhimõtteskeem [1]	126
Joonis 5.7. Ühefaasilise transistor inverteri põhimõtteskeem [1]	126
Joonis 5.8. Kolmefaasilise transistor inverteri põhimõtteskeem [1]	127
Joonis 5.9. Rootsi Rc5 veduri veojõu ning kasuteguri karakteristik [1]	128
Joonis 5.10. Veduri võimsustarbimise sõltuvus kiirusest [10]	129
Joonis 5.11. Kiirrongi veojõu väärtuse sõltuvus kiirusest [1]	129
Joonis 5.12. Veduri võimsustarbimise sõltuvus sõidu ajast [11]	130
Joonis 5.13. Genereeritava energia suhe peatuste vahekaugusesse [1]	131
Joonis 5.14. Pidurdamisel genereeritav võimused erinevatel pidurdamissüsteemide korral [1]	131
Joonis 5.15. Regeneratiivsel pidurdamisel ajamis tekkivate suurte voolude piiramine [1]	132
Joonis 5.16. Regeneratiivsel pidurdamisel suurte voolude piiramine [1]	133
Joonis 5.17. Veduri modelleerimise mudelid [18]	134
Joonis 6.1. Modelleeritud Eesti 110 kV elektrivõrgu PSCAD skeem	140
Joonis 6.2. Modelleerimisel kasutatud ekvivalentne pingesallikas.	141
Joonis 6.3. Lihula alajaama ekvivalendi „slider-control“ juhtimis põhimõte	141
Joonis 6.4. Kaheaheelalise õhuliini mudeli graafiline representatsioon PSCAD-is	142
Joonis 6.5. Õhuliini üldise konfiguratsiooni aken PSCAD tarkvaras	143
Joonis 6.6. Õhuliini mudel PSCAD tarkvaras	143
Joonis 6.7. Konverteeritud õhuliini PI-skeem PSCAD tarkvaras	144
Joonis 6.8. „Coupled PI Section“ mudeli graafiline representatsioon PSCAD-is	145
Joonis 6.9. „Coupled PI Section“ konfiguratsiooni aken PSCAD tarkvaras	145
Joonis 6.10. Kahe ja kolme mähisega jõutrafo mudelid PSCAD-is	146
Joonis 6.11. Kahe mähisega trafo konfiguratsiooni aken PSCAD tarkvaras	146
Joonis 6.12. Modelleeritud E-TRAN koormusmudel	147
Joonis 6.13. E-TRAN koormusmudeli konfiguratsiooni aken PSCAD tarkvaras	147
Joonis 6.14. 1-faasilise trafo lülitusskeem	149

Joonis 6.15. 1-faasilise trafo mudel PSCAD-is	150
Joonis 6.16. AT lülitusskeem	150
Joonis 6.17. AT mudel PSCAD-is	151
Joonis 6.18. Scott-trafo lülitusskeem	151
Joonis 6.19. Scott-trafo mudel PSCAD-is	152
Joonis 6.20. V-ühendusega trafo lülitusskeem	153
Joonis 6.21. V-ühendusega trafo mudel PSCADis	153
Joonis 6.22. Kontaktliini juhtide geomeetriline paiknemine raudteeliinil	155
Joonis 6.23. Juhtide peegeldusmeetod	156
Joonis 6.24. Elektriliselt ühendatud juhtide grupeerimine kontaktliinis	159
Joonis 6.25. Kontaktliini- ja kandejuhtmele ühise ekvivalendi leidmine	159
Joonis 6.26. Ekvivalentsed juhid $OC_{ekv}$ ja $R_{ekv}$	160
Joonis 6.27. Ekvivalentne juht $R_{ekvG}$	161
Joonis 6.28. Juhtide peegeldusmeetod	161
Joonis 6.29. Kontaktliini juhtide parameetrid	163
Joonis 6.30. Kontaktliini mudel 5 km kohta PSCADis	164
Joonis 6.31. Kontaktliini mudel 10 km kohta PSCADis	164
Joonis 6.32. Modelleeritud 50 km pikkune kontaktvõrgu lõik koos toitetrafoga.	165
Joonis 6.33. Elektriraudtee kontaktliinide süsteemi mudel	165
Joonis 6.34. Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamisega, suhtühikutes	166
Joonis 6.35. Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamisega	167
Joonis 6.36. Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamiseta, suhtühikutes	167
Joonis 6.37. Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamiseta	168
Joonis 6.38. Muutuvad takistid veduri mudelis	169
Joonis 6.39. Veduri aktiivtakistuse juhtimise loogikaskeem	169
Joonis 6.40. PSCADi mudeli skeem regeneratiivse pidurdamisega vedurile	170

Joonis 6.41. Mõõdetava suuruse visualiseerimine	170
Joonis 6.42. PSCADi mudeli skeem regeneratiivse pidurdamiseta vedurile	170
Joonis 6.43. Juhitava mudeli lähteandmete sisestamine PSCAD tarkvaras	172
Joonis 6.44. Juhitava mudeli takistuste arvutamine PSCAD tarkvaras	173
Joonis 6.45. PSCAD-i juhitava mudeli skeem regeneratiivse pidurdamisega vedurile	174
Joonis 6.46. Koormusgraafik regeneratiivse pidurdamisega veduri modelleerimisel	174
Joonis 6.47. Võrgupinge graafik regeneratiivse pidurdamisega veduri modelleerimisel	175
Joonis 6.48. Koormusgraafik regeneratiivse pidurdamiseta veduri modelleerimisel	175
Joonis 6.49. Modelleeritud võrgupinge graafik veduri regeneratiivse pidurdamiseta	176
Joonis 6.50. "Multiple Harmonic Current Source" mudel tarkvaras PSCAD	176
Joonis 6.51. "Multiple Harmonic Current Source" konfiguratsiooni aken	177
Joonis 6.52. „On-Line Frequency Scanner“ mudel PSCAD-is	178
Joonis 6.53. Veduri mudeli skeem koos harmoonikute allikaga	178
Joonis 7.1. Rail Balticu trassi Põhja- ja Kesk-Eesti osa koondplaan	185
Joonis 7.2. Rail Balticu trassi Edela-Eesti osa koondplaan	188
Joonis 7.3. Teoreetiline pingesümmeetria erinevate elektriraudtee koormuste ja alajaama lühisvõimuste korral	193
Joonis 7.4. Alajaama „Iru elektrijaam“ arvutuslik pingesümmeetria	194
Joonis 7.5. Alajaama „Järve“ arvutuslik pingesümmeetria	195
Joonis 7.6. Alajaama „Jüri“ arvutuslik pingesümmeetria	196
Joonis 7.7. Alajaama „Aruküla“ arvutuslik pingesümmeetria	197
Joonis 7.8. Alajaama „Kiisa“ arvutuslik pingesümmeetria	198
Joonis 7.9. Alajaama „Rapla“ arvutuslik pingesümmeetria	199
Joonis 7.10. Alajaama „Kehtna“ arvutuslik pingesümmeetria	200
Joonis 7.11. Alajaama „Järvakandi“ arvutuslik pingesümmeetria	201
Joonis 7.12. Alajaama „Sindi“ arvutuslik pingesümmeetria	202

Joonis 7.13. Alajaama „Metsakombinaadi“ arvutuslik pingesümmeetria	203
Joonis 7.14. Alajaama „Papiniidu“ arvutuslik pingesümmeetria	204
Joonis 7.15. Alajaama „Kilingi-Nõmme“ arvutuslik pingesümmeetria	205
Joonis 7.16. Ülekandeliinide koormatus aastal 2020 ning elektriraudtee liitumisel „Iru“, „Järve“ või „Kiisa“ alajaamas.	206
Joonis 7.17. Ülekandeliinide koormatus aastal 2020 ning elektriraudtee liitumisel „Iru“, „Aruküla“ või „Jüri“ alajaamas.	207
Joonis 7.18. Ülekandeliinide koormatus aastal 2020 ning elektriraudtee liitumisel „Rapla“, „Kehtna“ või „Järvakandi“ alajaamas.	208
Joonis 7.19. Ülekandeliinide koormatus aastal 2020 ning elektriraudtee liitumisel „Sindi“, „Metsakombinaadi“, „Papiniidu“ või „Kilingi-Nõmme“ alajaamas.	209
Joonis 7.20. Ülekandeliinide koormatus aastal 2030 ning elektriraudtee liitumisel „Iru“, „Järve“ või „Kiisa“ alajaamas.	210
Joonis 7.21. Ülekandeliinide koormatus aastal 2030 ning elektriraudtee liitumisel „Iru“, „Aruküla“ või „Jüri“ alajaamas.	211
Joonis 7.22. Ülekandeliinide koormatus aastal 2030 ning elektriraudtee liitumisel „Rapla“, „Kehtna“ või „Järvakandi“ alajaamas.	212
Joonis 7.23. Ülekandeliinide koormatus aastal 2030 ning elektriraudtee liitumisel „Sindi“, „Metsakombinaadi“, „Papiniidu“ või „Kilingi-Nõmme“ alajaamas.	213
Joonis 7.24. Kontaktvõrgu toitetrifode astmelüliti juhtimissüsteem	216
Joonis 7.25. Astmelüliti juhtimissüsteemi PI kontrolleri seadistus	217
Joonis 7.26. Koostatud pingesümmeetria mõõteblokk PSCAD-is	218
Joonis 7.27. Iru, Kallavere, Ida ja Järve alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Iru alajaamas	220
Joonis 7.28. Lasnamäe, Jüri, Kiisa ja Aruküla alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Iru alajaamas	221
Joonis 7.29. Iru, Kallavere, Ida ja Järve alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Iru alajaamas	222

Joonis 7.30. Järve, Iru, Kallavere ja Järve alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Järve alajaamas	223
Joonis 7.31. Lasnamäe, Jüri, Kiisa ja Aruküla alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Järve alajaamas	224
Joonis 7.32. Järve, Iru, Kallavere ja Ida alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Järve alajaamas	225
Joonis 7.33. Kiisa, Lasnamäe, Jüri ja Aruküla alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Kiisa alajaamas	226
Joonis 7.34. Järve, Iru, Kallavere ja Järve alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Kiisa alajaamas	227
Joonis 7.35. Kiisa, Aruküla, Lasnamäe ja Jüri alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Kiisa alajaamas	228
Joonis 7.36. Aruküla, Jüri, Lasnamäe, ja Kiisa alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Aruküla alajaamas	229
Joonis 7.37. Iru, Kallavere, Jüri ja Järve alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Aruküla alajaamas	230
Joonis 7.38. Aruküla, Jüri, Lasnamäe ja Kiisa alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Aruküla alajaamas	231
Joonis 7.39. Jüri, Lasnamäe, Kiisa ja Aruküla alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Jüri alajaamas	232
Joonis 7.40. Järve, Iru, Kallavere ja Ida alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Jüri alajaamas	233
Joonis 7.41. Jüri, Lasnamäe, Kiisa ja Aruküla alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Jüri alajaamas	234
Joonis 7.42. Järve, Iru, Kallavere ja Ida alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Jüri alajaamas	235
Joonis 7.43. Rapla, Kehtna, Järvakandi, Kohila ja Paide alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Rapla alajaamas	236
Joonis 7.44. Viljandi, Vändra, Sindi, Kilingi-Nõmme ja Lihula alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Rapla alajaamas	237

Joonis 7.45. Rapla, Kehtna, Järvakandi ja Kohila alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Rapla alajaamas	238
Joonis 7.46. Kehtna, Järvakandi, Rapla, Kohila ja Paide alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Kehtna alajaamas	239
Joonis 7.47. Viljandi, Vändra, Sindi, Kilingi-Nõmme ja Lihula alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Kehtna alajaamas	240
Joonis 7.48. Kehtna, Järvakandi, Rapla, Kohila alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Kehtna alajaamas	241
Joonis 7.49. Järvakandi, Kehtna, Rapla, Kohila ja Paide alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Järvakandi alajaamas	242
Joonis 7.50. Viljandi, Vändra, Sindi, Kilingi-Nõmme ja Lihula alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Järvakandi alajaamas	244
Joonis 7.51. Järvakandi, Kehtna, Rapla, Kohila alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Järvakandi alajaamas	245
Joonis 7.52. Sindi, Metsakombinaadi, Papiniidu ja Vändra alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Sindi alajaamas	246
Joonis 7.53. Paikuse, Paide, Viljandi ja Kilingi-Nõmme alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Sindi alajaamas	247
Joonis 7.54. Sindi, Metsakombinaadi, Papiniidu, Kilingi-Nõmme alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Sindi alajaamas	248
Joonis 7.55. Metsakombinaadi, Sindi, Papiniidu ja Vändra alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Metsakombinaadi alajaamas	249
Joonis 7.56. Paikuse, Paide, Viljandi ja Kilingi-Nõmme alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Metsakombinaadi alajaamas	250
Joonis 7.57. Sindi, Metsakombinaadi, Papiniidu, Kilingi-Nõmme alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Metsakombinaadi alajaamas	251
Joonis 7.58. Papiniidu, Metsakombinaadi, Sindi ja Vändra alajaamas tekkiv pingesümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Papiniidu alajaamas	252

- Joonis 7.59. Paikuse, Paide, Viljandi ja Kilingi-Nõmme alajaamas tekkiv pingeasümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Papiniidu alajaamas 253
- Joonis 7.60. Sindi, Metsakombinaadi, Papiniidu, Kilingi – Nõmme alajaamas tekkiv pingeasümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Papiniidu alajaamas 254
- Joonis 7.61. Kilingi-Nõmme, Viljandi, Paikuse, Paide alajaamas tekkiv pingeasümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Kilingi-Nõmme alajaamas 255
- Joonis 7.62. Papiniidu, Metsakombinaadi, Sindi, Vändra alajaamas tekkiv pingeasümmeetria tegur, kui elektriraudtee liitub Kilingi-Nõmme alajaamas 256
- Joonis 7.63. Sindi, Metsakombinaadi, Papiniidu, Kilingi-Nõmme alajaamas tekkiv pingeasümmeetria tegur, elektriraudtee kontaktvõrgu ebasümmeetrilise koormuse korral Kilingi-Nõmme alajaamas 257



Tabel 1.1. TTÜ linnaku trafod ja nende koormused	29
Tabel 1.2. TTÜ linnakus kasutatavad kaablid ja kaablite koormused	30
Tabel 1.3. TTÜ linnaku liini pikkused ja kaabli margid	31
Tabel 1.4. TTÜ linnaku 5.12.2009 a tarbimise andmed, kWh	31
Tabel 1.5. Lihtsa võrgu liinide parameetrid	32
Tabel 1.6. Lihtsa võrgu trafode parameetrid	32
Tabel 1.7. Pinged AJ lattidel TTÜ linnaku mudelis 50% koormusega ülejäänud võrgus	35
Tabel 1.8. Pinged AJ lattidel TTÜ linnaku mudelis 75% koormustega ülejäänud võrgus	36
Tabel 1.9. Trafode koormatus TTÜ linnaku mudelis 75% koormustega ülejäänud võrgus	37
Tabel 1.10. TTÜ linnakus modelleerimisel kasutatud laetavate elektriautode variandid	38
Tabel 1.11. Pingemoonutused (THD) alajaamade lattidel	39
Tabel 1.12. Pingemoonutused (THD) erinevatel pingetel	46
Tabel 2.1. Standardi IEC 61851 laadimistüübid	53
Tabel 2.2. TLA kestvus erinevates võrkudes erinevate lühiste korral [5]	56
Tabel 3.1. Juhtmete andmed [8]	78
Tabel 3.2. BT ja AT eelised ja puudused	92
Tabel 4.1. Vooluharmonikute amplituudväärtused suhtelistes ühikutes, mõõdetud Scott ja 1-faasilise trafo primaarpoolel [20]	107
Tabel 4.2. Vooluharmonikute sümmeetrilised komponendid suhtelistes ühikutes, mõõdetud Scott ja 1-faasilise trafo primaarpoolel [20]	107
Tabel 4.3. Harmoonilise voolukomponendi piirväärtused [21]	109
Tabel 4.4. Reaalsete mõõtetulemuste ning simulatsiooni tulemuste võrdlus [21]	109
Tabel 4.5. Simulatsiooni tulemused, asümmeetrilise koormuse korral [19]	112
Tabel 4.6. Simulatsiooni tulemused, sümmeetrilise koormuse korral [19]	112
Tabel 4.7. Pinge harmoonikud mõõdetud veoalajaama trafodel 1 ja 2 [24]	113
Tabel 4.8. Voolu harmoonikud mõõdetud veoalajaama trafodel 1 ja 2 [24]	114
Tabel 6.1. Elektrivõrgu ekvivalentssed takistused	142

Tabel 6.2. Trafode parameetrid	149
Tabel 6.3. Kontaktliini juhtide nimiandmed	154
Tabel 7.1. Potentsiaalsete liitumisalajaamade parameetrid	190

## Uurimustöö II etapi lühikokkuvõte ja kaalukamad järeldused

Viimaste aastate jooksul on Eestis üha rohkem hakanud levima elektriautod, millest tulenevalt osutub vajalikuks nende laialdase kasutamise mõju täpsustamine Eesti elektrisüsteemile. Samuti on käivitunud projekt Rail Baltic, mille raames soovitakse rajada uus elektrirongiühendus Eestist Euroopa südamesse. Eelnevat arvestades on vajalik uurida planeeritava elektertranspordi mõju elektrivõrgule ja sarnaselt olemasoleva elektrivõrgu mõju planeeritavale elektertranspordile.

Käesoleva aruande esimene pool keskendub elektriautode uurimisele, kus on vaadeldud kahte probleemi. Esiteks elektriautode tavalaadimine ja selle mõju elektri kvaliteedile, kus vaadeldakse mitu elektriautot võib teoreetiliselt üheaegselt elektrivõrgus laadida ilma, et see avaldaks mõju elektrikvaliteedile. Uuritavateks piirkondadeks on TTÜ Mustamäe linnaku 0,4 – 35 kV kaabelvõrk ühendusega Järve 110 kV alajaama ning lihtsustatud õhuliinidega elektrivõrk pingel 0,4 – 110 kV, kus ainsaks tarbijaks on 0,4 kV poolele ühendatud elektriautod. Teiseks, Eleringi seisukohast praktilisemaks, on ülekandevõrgus toimuvate katkestuse mõju uurimine elektriautode laadimistsüklile. Nimelt toimub elektrivõrgus aeg-ajalt lülitusi ja toitepinge lühiajalisi katkestusi. Tõenäosus, et korraga toimuks ülekandevõrgus lühis või muu lülitus ja et elektriauto laadimist mõõdetakse samal ajal piisava täpsusega, on väike. Antud olukorda on võimalik aga tekitada laborikatsetega. Katsed viidi läbi spetsiaalse ehitatud seadmega, mille abil tekitati laadimistsükli ajal elektriautole toitepinge katkestus, imiteerides nii võrgus esinevaid lühiajalisi katkestusi. Katsed viidi läbi TTÜ kasutuses oleva elektriautoga.

Järgnevalt on toodud elektriautode uurimuse kolm olulisemat tulemust:

- 300 elektriauto üheaegne tavalaadimine TTÜ linnakus on võimalik ning see ei avalda tänaste tarbimisvõimsuste juures märgatavat mõju pingeniivoole. Muudatus jääb alla 5% kõigis uuritud 0,4 – 110 kV alajaamades.
- Suurel hulgal elektriautode korraga laadimiseks tuleks autod võrku ühendamisel jagada faaside vahel võrdselt ning vältida koormuse koondumist ühte faasi. Sellisel juhul vähendatakse kõrgemate harmoonikute osakaalu. Sõltumata laadijate ühendamise viisist (ühes või erinevates faasides) on elektri kvaliteedi halvenemise mõju pigem lokaalne.
- Ülekandevõrgus toimuva 0,2 sekundilise lühise korral on tehtud katsete põhjal elektriauto laadimistsükli võimalik katkestus ligikaudu 10 sekundit. Auto üldist laadimiskii- rust ja -protsessi ennast selline katkestus ei mõjuta. Küll aga peaks katkestus olema näha kõigil laadivatel autodel ning hetkelise tarbimise kadumisega tuleb süsteemis arvestada.

Aruande teine pool käsitleb Balti riikide ja Euroopa raudteevõrgu ühildamiseks planeeritava Rail Balticu võimalikke mõjusid Eesti elektrivõrgule. Kõigepealt analüüsitakse kontaktvõrgus tekkivaid olulisemaid probleeme ning nende mõju elektrisüsteemile ja -kvaliteedile. Kirjeldatakse ja antakse ülevaade mudelite koostamisest *PSCAD* tarkvaras nii ülekandevõrgule, kontaktliinidele kui ka elektrirongidele ja lahendatakse rida modelleerimisülesandeid. Antud aruande üheks oodatavaks tulemuseks on võimalike Rail Balticu liitumispunktide sobilikkuse hindamine. Võimalike liitumispunktide valikul lähtuti Rail Balticu planeeritavate trassivariantide vahetus läheduses paiknevast elektrivõrgust.

Järgnevalt on toodud Rail Balticut puudutavad kolm olulisemat tulemust:

- Arvestades valitud alajaamade ülekandeliinide koormatust selgub, et kõik vaadeldavad liinid on alakoormatud ja elektriraudtee koormuse lisandumine ei avalda olulisel määral mõju nende koormatusele.
- Alajaamade elektrilise tugevuse seisukohast ilmnevad tõsised probleemid. Kõige probleemsem on olukord Pärnumaa lõunaosas, kus puudub raudtee elektrivõrguga liitumiseks sobiv ülekandevõrk. Antud piirkonnas osutub vajalikus olemasolevate ühenduste tugevdamine või uute rajamine. Tulenevalt ülekandeliinide alakoormusest on kõne all olevad investeeringud vajalikud vaid Rail Balticu tarvis, seega on antud lahendus majanduslikult raskesti põhjendatav.
- Lähtuvalt elektriraudtee koormuse poolt põhjustatud tegeliku pingesümmeetria analüüsist, osutuvad liitumispunktideks sobivateks vaid Harjumaal paiknevad Iru, Järve ja Aruküla alajaamad. Lisaks sobib praeguse analüüsi põhjal liitumispunktiks teoreetiliselt ka Kiisa alajaam. Käesoleval hetkel aga ei ole selged elektriraudtee võimalikud mõjud avarielektrijaamale ning Estlink-1 alalisvooluühendusele, mistõttu on Kiisa alajaama vaadeldud kui mittesobivat alajaama. Tulemustest selgus, et pingesümmeetria tekitab olulisi probleeme kõigis valitud Rapla- ja Pärnumaa alajaamades ning vaid täiendavate lahenduste rakendamisel (eritüübilised trafod, uued ühendusliinid või *FACTS* seadmete kasutamine) osutub võimalikuks antud piirkonda elektriraudtee rajamine.

## Uurimustöö teise etapi lõpparuande ülevaade

TTÜ energeetikateaduskond koostöös Elering ASiga on viimased kaks aastat uurinud elekt-ranspordi mõju elektrivõrgule ja elektrivõrgu mõju elektertranspordile. Eleringi huvist lähtuvalt on peamiseks uurimisteemaks ülekandevõrk ja võimalikud liituvad Rail Balticu elektrirongide liitumispunktid. Kõik tänased ja tulevased elektritarbijad on aga ülekandevõrgu kliendid, seega on teiseks suureks huviobjektiks elektriautod ja nende mõju elektrivõrgule, tulenevalt nende suurest ja üha kasvavast levikust Eestis.

Projekti teist aastat kokku võttes saab öelda, et juba eelnevalt läbitöötatud kirjandus on uue pilguga üle vaadatud. Aasta jooksul on tekkinud uusi teadmisi ja kogemusi seni loetu paremaks mõistmiseks. Teine aasta on enim keskendunud teooria rakendamisele praktikas. Alustatud on elektriautode ja elektrirongide modelleerimisega ja võrguarvutuste tegemisega.

Suuremaks, kahes peatükis eraldi käsitatavaks, teemaks on elektriautode mõju elektrivõrgule ja vastupidine elektrivõrgu mõju elektriautole. Esmalt arvutatakse elektriautode mõju jaotusvõrgule ja analüüsitakse mõju võimalikku levikut jaotusvõrgust ülekandevõrku. Analüüsi teostatakse TTÜ linnaku näitel. Lisaks on samas peatükis toodud lihtsustatud kujul nn „lihtne võrk“, kus uuritakse ainuüksi elektriautodest koosnevat koormust ja elektriautode mõju levimist elektrivõrgus. Tegemist on näitliku võrguarvutusega, kus kuni 110 kV trafoni on võrgu ainsateks tarbijateks 0,4 kV võrku ühendatud elektriautod.

Teises peatükis käsitletakse ülekandevõrgus toimuva lühise mõju elektriautode laadimistsükli-le. Elektrivõrgus toimub aeg-ajalt lülitusi, millega tulemuseks võib olla toitepinge lühiajaline katkestus või langus. Seega uuritakse, millised võivad olla ülekandevõrgu taaslülituste ja lühemate toitepingekatkestuste mõjud elektriauto laadimisele. Selleks otstarbeks on ehitatud katse-seade ning mõõdetud on elektriauto laadimistsükli katkestuse ajal.

Edasises osas on antud aruandes uurimisobjektis Rail Balticu projekt koos elektrirongide ning elektrivõrgu taristuga. Aruande kolmas peatükk käsitleb üldises plaanis raudteel kasutatavaid elektrisüsteeme (kontaktvõrgulahendusi). Lisaks on ära toodud detailsemad näited teiste riikide põhjal (sh Soome, Jaapan, Hiina, jt). Arutletakse, millist toitepinge lahendust peaks kasutama ning uuritakse, kas ja milliseid lisatrafosid on erinevatel lahendustel tarvis rakendada.

Sõltuvalt elektriraudteeliinil rakendatavast kontaktvõrgu süsteemist avaldab viimane olulist mõju nii raudteeliini toitesüsteemile kui ka kogu elektrivõrgule. Peatükis neli on eraldi välja toodud kontaktvõrkudes esinevad probleemid ja suuremad mõjud ning elektri kvaliteedi mõju-

tatavus. Viimast tuleb silmas pidada elektriraudteesüsteemi elektrivõrku ühendamisel tulenevalt selle eripäradest – kaasnev pinge asümmeetria ja pidevalt suurtes piirides muutuvad koormused.

Raudteel kasutusel olevatel veduritüüpidel ja nendes rakendatavatel tehnoloogiatel on kandev roll nii elektriraudteesüsteemi sisestele mõjudele ja nende ulatusele kui ka nende kandumisele kogu ülejäänud elektrivõrku. Sellest tulenevalt osutub vajalikuks analüüsida erinevaid veduritüüpe ja nende karakteristikuid, millele keskendub aruande viies peatükk.

Kuues peatükk koondab enda alla antud uurimustöös vajaminevate mudelite kirjeldamise ja nende koostamise. Peatükk selgitab 110 kV ülekandevõrgu modelleerimiseks vajalikke parameetreid ning kirjeldab ülekandevõrgu mudeli koostamiseks ja optimeerimiseks rakendatud lihtsustusi. Peatüki viimane osa kirjeldab elektriraudtee vedurite mudeleid ja nende modelleerimist *PSCAD* tarkvaras.

Aruande viimane, seitsmes peatükk on senise töö teaduslik resultaat, koondades kogu elektrisüsteemi, kontaktvõrgu ning vedurite ja nende ajamite modelleerimisalase teadmise. Tulemuseks on detailne alajaamade täpsusega toodud planeeritava Rail Balticu elektrivõrku ühendamise hinnang lähtudes ülekandevõrgust ja selles paiknevatest alajaamadest. Peatükk määratleb ja analüüsib elektriraudtee liitumispunktideks sobivad alajaamad, lähtudes nii raudteetrassi ja alajaamade geograafilisest paiknemisest, esmasest pingeasümmeetria analüüsist kui ka elektriliinide ülekandevõimsusest. Seejärel keskendutakse elektriraudtee talitlusest tingitud võimsusvoogude muutumisele ning sõlmalajaamade latipingete muutustele. Peatüki viimane osa kirjeldab pingeasümmeetria analüüsiks koostatud stsenaariumeid ning esitatakse saadud tulemuste analüüsi põhjal lõplik hinnang potentsiaalsetele liitumispunktidele.

Seitsmendat peatükki järel on veel kord terve käesolev aruanne peatükkide kaupa kokku võetud ja aruanne lõppeb projekti kolmanda etapi plaanide ülevaatega. Koostöös Elering ASiga on kahe aasta jooksul uuritud ennekõike elektrivõrgu tehnilisi probleeme ning püütud on võimalikult täpselt elektertranspordi laienemisega kaasnevaid tagajärgi hinnata. Projekti kolmandas etapis soovitakse lisaks vaadata ka mõju elektri tarbimisele ja tarbimise muutusele. Samuti on soovitatav uurida suurte projektide nagu elektriautod ja Rail Baltic kaudsemaid mõjusid energiamajandusele, keskkonnale ja energiabilansile. Täpsem kirjeldus on toodud aruande lõpus.

Käesolevas aruandes on lugemise lihtsustamiseks toodud kirjanduse loetelud eraldi välja iga peatüki lõpus.

# 1. Elektriautode laadimise mõju elektrivõrgule

Elektriautode turule tulekut ja elektriautode osakaalusid tulevikus on hinnatud erinevate autorite poolt erinevalt [1]. Optimistlike hinnangute kohaselt peaks näiteks aastaks 2016 USA teedel ringi liikuma ligikaudu 1,5 miljonit elektriautot ning aastaks 2030 juba ligikaudu 50 miljonit [2]. Mõnevõrra realistlikum hinnang on, et aastaks 2017 müüakse iga aastaselt USAs ligikaudu 300 000 elektriautot [3]. Euroopas, näiteks Belgias, hinnatakse elektriautode osakaaluks aastaks 2030 ligemale 30% [4]. Saksamaal on Belgiaga sarnane siht, mis teeks sealse autode koguarvu juures aastaks 2020 miljon elektriautot ning aastaks 2013 viis miljonit [5].

Elektriautode laadimise tõttu lisanduvad koormused võivad endaga kaasa tuua ulatuslikke pingelange liitumispunktides. Samuti võivad suurenevad harmoonikute vood ja pinge asümmeetria ületada võrguettevõtjate poolt kehtestatud lubatud piire. Kõige enam avaldavad kõrgemate harmoonikute vood mõju jaotusvõrgu trafodele ja kaablitele ning klientide seadmetele. Tulemuseks võivad olla seadmete eluea vähenemine ning ettearvamatud avariid [6].

Elektriautode laadimise võimsus ei tohiks tegelikkuses kunagi kasvada nii suureks, et see tooks endaga kaasa elektritootmise või ülekandevõimsuste defitsiidi [7]. Näiteks Saksamaal oleks miljoni elektriauto laadimisest lisanduv energiakulu 20 TWh, mis on 0,3% kogu Saksamaa tootetavast elektrienergiast [8]. Seega ei ole elektriautode laadimisest lisanduv koormus primaarne probleem.

## 1.1 Elektriautode põhjustatav pingelang

Elektriautode laadimisega lisanduv koormus põhjustab trafodel ja kaablites lisa pingelangu. Täiendav pingelang võib osutada probleemiks neile tarbijatele, kes asuvad toitealajaamast kaugel ja tahavad siiski oma elektriautot laadida. Sellest tulenevalt on tarvis uurida võrgu nõrgemaid kohti ja analüüsida halvimaid stsenaariume [9].

Uurimuses [8] on elektriautodest tulenevaid pingelange uuritud arvestades liini pikkusi. Lähtutud on nii linna kui ka maapiirkonna elektrivõrgutest ning hinnatud on liini pikkust kahe kuni kaheks elektriauto laadimiseks. Tulemusena saadi, et kuni 700 m pikkuse liini lõppu on võimalik ühendada kuni kaks autot, ilma võrgu parameetreid rikkumata. 300 m liini lõpus on selleks arvuks vastavalt kuni kaheks autot.

Kesk-Euroopa talvistele ja suvistele koormustele lisanduvad elektriautode laadimisvõimsuste mõjud on täpsemalt kirjeldatud allikas [10]. Arvestades erinevaid tarbimisaegu ja võimsustippe

on jõutud järeldusele, et 10% ja 20% elektriautode osakaalu juures jääksid pingelangud enamasti alla 10%. 10%-ne pingelang ilmnes simulatsioonide tulemustest alles üle 30% elektriautode osakaalu juures. Sarnased tulemused on saadud ka uurimuses [11], kus 16 A laadimisvoolu juures 230 V pingel peaks elektriautode osakaal olema ligikaudu 28%, saavutamaks liini lõpus pingelanguks 10%.

## **1.2 Elektriautode põhjustatav pingete asümmeetria**

Kuigi suur osa elektriautode laadimisest toimub ühefaasiliste laadijatega, siis arvestades suurt autode hulka jagunevad kolmeefaasilises süsteemis koormused siiski võrdselt faaside vahel. Elektriauto laadimine erineb teistest ühefaasilistest tarbijates keskmisest pikema kestvuse ja suurema üheaegsusteguri poolest [12]. See loob omakorda võimaluse, kus teatud hetkedel on tarbimine ühes faasis siiski märgatavalt suurem. Selline voolude erinevus võib tingida pingete asümmeetria jaotustrafos ning ka märgatavad voolud neutraaljuhhis.

Lubatavaks pingesümmeetria määraks madalpingevõrkudes on üldiselt 2% [13]. Tavaliseks asümmeetria väärtuseks ilma elektriautodeta on ligikaudu 1% või pisut enam [12]. Elektriautodest lisanduv asümmeetria on oluliselt sõltuvuses laadimisvoolu suurusest. Lisaks võib pingesümmeetria oluliselt erineda fiidri eri punktides [14]. Simulatsioonis [14] eeldatud 30% elektriautode osakaalu ja 20 A voolu juures leitud keskmiseks pingesümmeetria väärtuseks on 1,9%, kuid 34% juhtudest ületas pikima fiidri lõpus pingesümmeetria 2%.

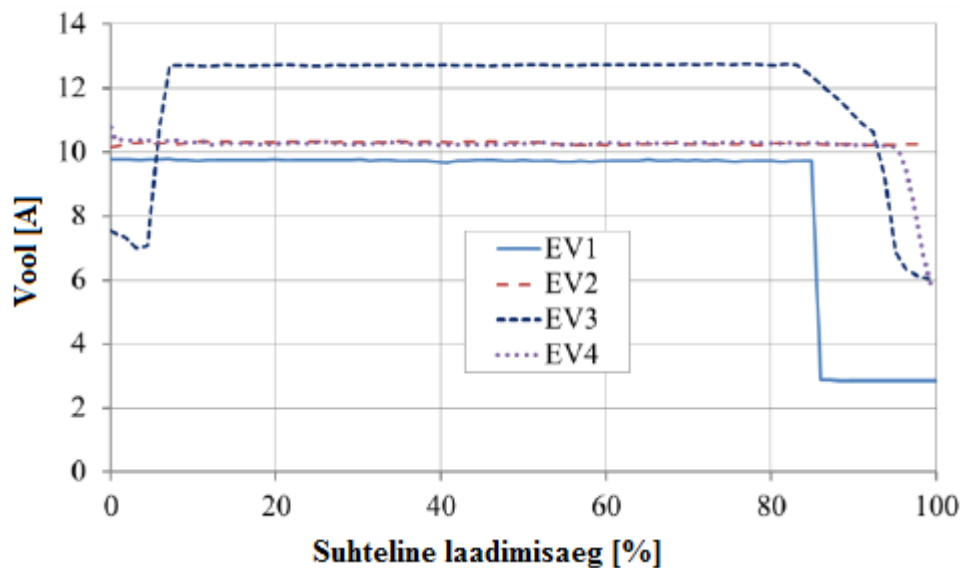
Erinevate elektriautode tarbimise osakaalude juures on täpse pingesümmeetria väärtuse ennustamine keeruline. Eeldada aga võib, et mõningatel juhtudel võib pingesümmeetria siiski probleemiks osutada [6].

## **1.3 Elektriautode põhjustatavad kõrgemad harmoonikud**

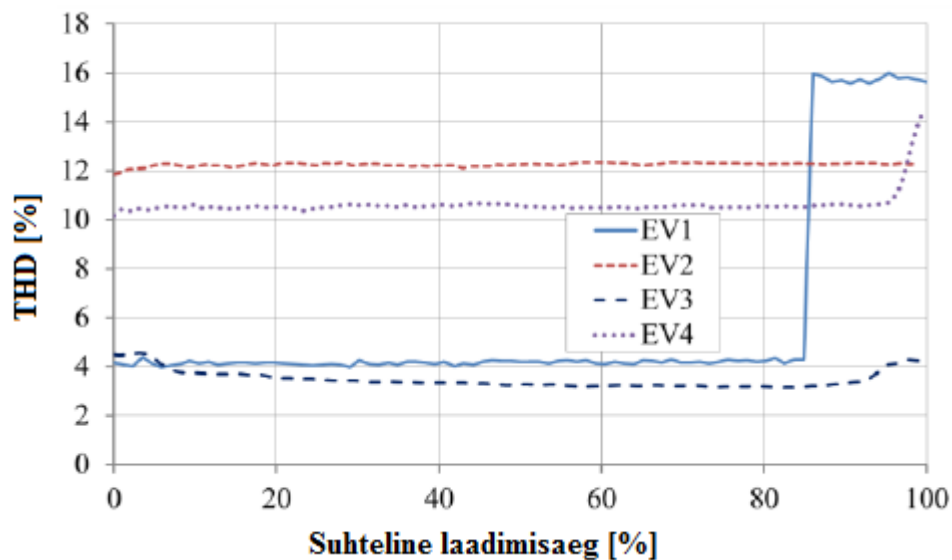
Elektriautode laadimisest tulenevad kõrgemad harmoonikud on otseselt seotud laadijate topoloogiaga. Akude laadimiseks on vaja alalispinget, mille saamiseks on kõige lihtsam võimalus kasutada ühefaasilist täisperioodalaldit. Sellise kontrollimata juhtimisega alaldi miinuseks on suured vooluharmoonikute väärtused. Esimese generatsiooni laadijate mõõtmistulemused näitavad, et laadimisvoolu moonutuseks (*THD*) on keskmiselt 50% [15]. Tänapäevaste juhtimisüsteemidega alaldid võimaldavad laadimisvoole aga isegi alla 5%, kui laetakse suurema kui 50% nimivõimsusega [16]. Järgnevatel graafikutel on toodud nelja hetkel laialt levinud elektriauto laadimisprotsesside voolud (Joonis 1.1) ja voolumoonutused (Joonis 1.2) uurimuse [17]



põhjal. Erinevate autode laadimisprotsesside paremaks võrdlemiseks on tulemused toodud suhtelise laadimisaja kohta ehk akude laadumine nullist kuni 100%-ni, kuna tegelikkuses on kõikide autode laadimisaeg mõnevõrra erineva pikkusega.



Joonis 1.1. Laadimisvool võrrelduna suhtelise laadimisajaga [17]



Joonis 1.2. Voolumoonutus võrrelduna suhtelise laadimisajaga [17]

Graafikutelt on näha, et erinevatel autodel on ka erinevad laadimissüsteemid ja sellest tulenevalt erineva kujuga laadimisvoolud. See tähendab, et laadimisvoolus sisalduvad kõrgemad harmoonikud on sõltuvalt autost erinevate amplituudidega ja nurkadega. Seetõttu on oluline harmoonikute amplituudide kõrval mõõta ka nende nurkasid [18]. Paraku ei ole seni selliseid andmeid väga palju avaldatud. Täpsete hinnangute andmiseks tuleks elektriautode modelleerimisel arvestada ka erinevate autodega võrgus, kuna erinevate laadimismustrite arvu kasvades võib suurema ka harmoonikute omavaheline sumbumine [19].

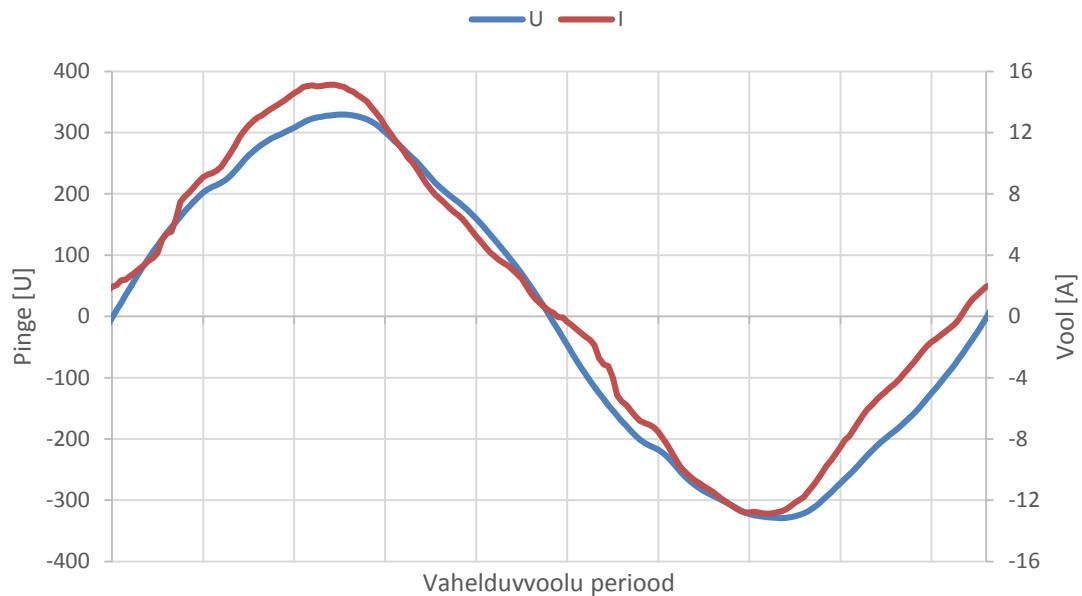
Vooluharmonikud võivad omakorda põhjustada märgatavaid pingeharmonikuid. Üldiselt on jaotusvõrkudes lubatavaks pingemoonutuse määraks (*THD*) 8% [20], kuid tihti kehtestatakse ka madalamaid piire.

Halvimaid juhtumeid kirjeldavas uurimuses [21] on saadud pingemoonutusteks erinevates punktides 2,6% kuni 5,2%. Kirjeldatavas töös oli uurimise all 15 kVA võimsusega trafo ning minimaalseid nõudeid täitev laadija, mille voolumoonutus oli 17,3%. Lisaks elektriautode oli koormuseks ka tüüpilised majapidamise seadmed ning võrgust tuleva pingemoonutuse väärtsuks arvestati 1,5%. Nimetatud tulemused saadi, kui elektriauto laadimine toimus kõikides majapidamistes.

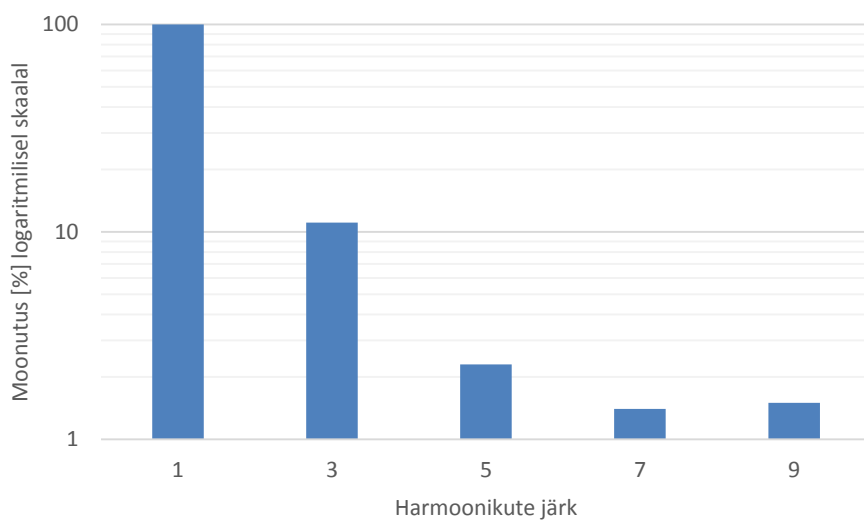
Kirjeldatud on ka juhtumeid, kus elektriautode lisandumine ei too kaasa pingemoonutuste kasvu, kuna toimib efektiivne harmoonikute sumbumine [22]. Märkida tuleb, et kodumajapidamise koormustest ja elektriautode laadimistest koosnevate voolude harmoonikuid ei ole kindlate järelduste tegemiseks veel piisavalt laialdaselt uuritud [6].

#### **1.4 Modelleerimises kasutatavad elektriautod**

Sõltumata laadimise viisist ühendatakse elektriautod madalpingevõrku ning nende otsest mõju on tunda ennekõike samas võrgus olevatel teistel tarbijatel. Kuna elektriauto laadimine toimub alalispingel, siis laadimisprotsessis kasutatakse muundureid, mis sisaldavad endas erinevat elektroonikat. Elektroonikakomponentide ebalineaarsuste tõttu tarbitakse võrgust mittesiinuseelist voolu nagu on toodud järgneval graafikul (Joonis 1.3). Graafikul 1.3 on võrreldud toitepinge ja elektriauto laadimisvoolu siinuselist kuju ning sellele järgnev joonis (Joonis 1.4) kajastab siinuskuju rikkuvate kõrgemate harmoonikute sisaldust.

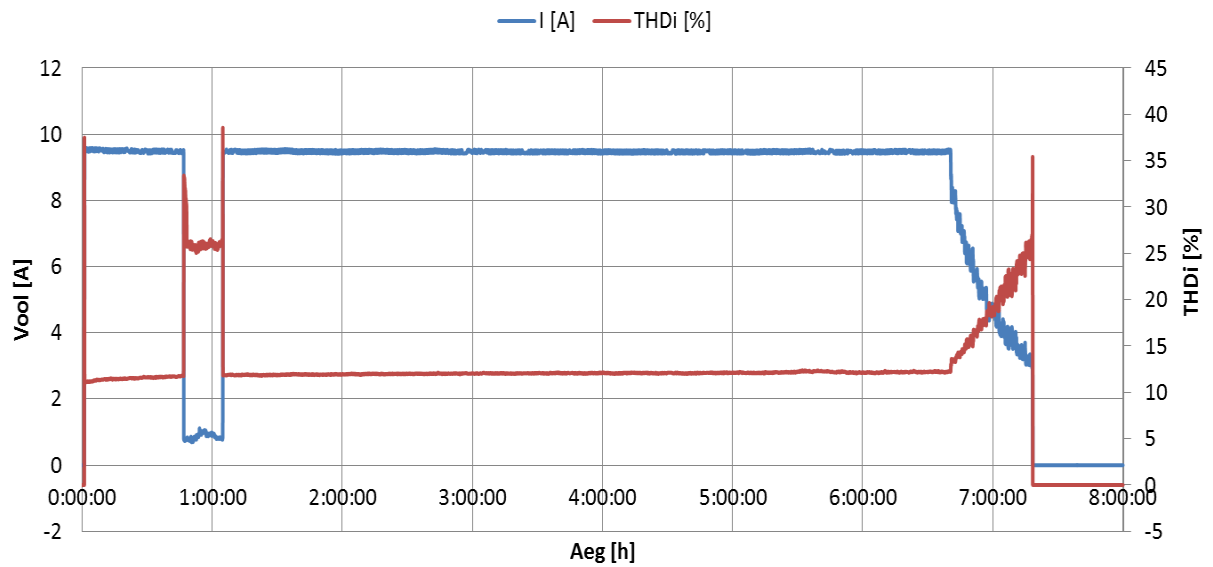


Joonis 1.3. Toitepinge ja voolu siinuskõver elektriauto laadimise ajal

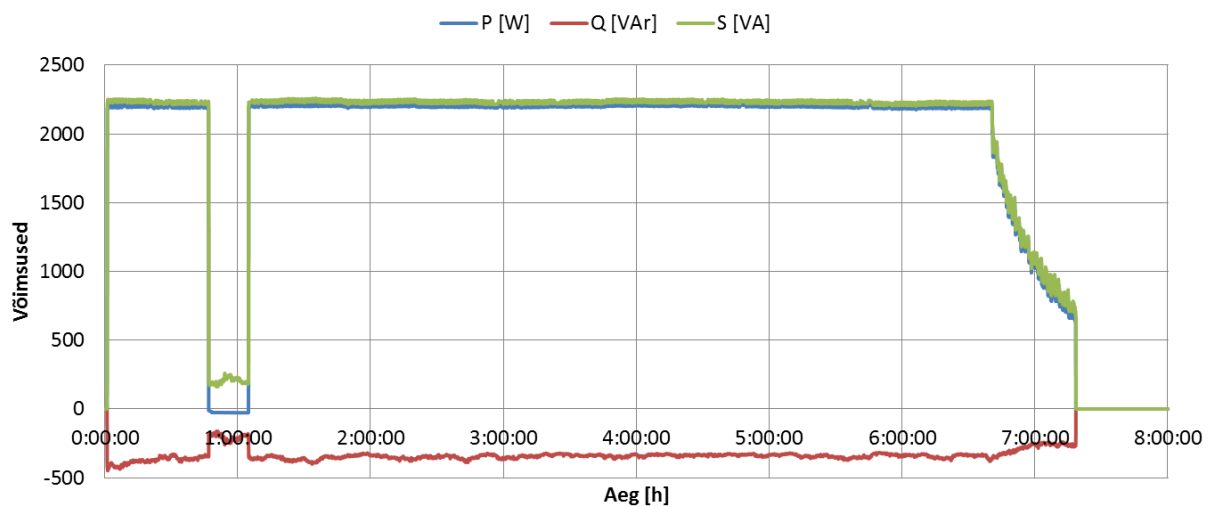


Joonis 1.4. Elektriauto laadimisvoolu moonutus harmoonikute kaupa.

Edasi on antud uurimustöö tarbeks mõõdetud elektriauto laadimisvool ja selle moonutus (Joonis 1.5), selgub, et elektriauto laadimisvool on ligikaudu 10 A ning voolu moonutus (*THD*) 3%. Elektriauto laadimisprotsess tavalisepärase aeglase laadimisega kestab ligikaudu seitse-kaheksa tundi. Selle protsessi võimsused on toodud graafikul (Joonis 1.6), kus keskmine aktiivvõimsus laadimisprotsessi käigus on ligikaudu 2,2 kW ning reaktiivvõimsus 0,3 kVar.



Joonis 1.5. Elektriauto aku laadimisvool ja voolu moonutust hindav tegur THD



Joonis 1.6. Elektriauto aku laadimisprotsessi võimsused

Uurimaks elektriautode mõju elektrivõrgule, on vaatlemiseks võetud kaks erinevat elektrivõrgu piirkonda, millest üks on tüüpiline kaablivõrk ja teine õhuliinide kaudu toite saav eratarbija. Mõlema juhul on võrku ühendatavate elektriautode hulk valitud nii suur, et mõju oleks märgatav, kas läbi toitepinge languse või trafo täiskoormuse saavutamise.

## 1.5 Elektrivõrgu kirjeldus

Uurimustöö esimeseks uuritavaks võrgupiirkonnaks on võetud TTÜ Mustamäel asuv ülikoolilinnak, mis on täies ulatuse kaabelvõrk. Teiseks näidisvõrguks on valitud võimalikult lihtne võrk 0,4 kV tarbijast kuni 110 kV võrguni ilma teiste tarbijateta ja võrguosadeta. Lihtsuse mõttes on selline võrk nimetatud kui „lihtne võrk“.

### 1.5.1 TTÜ ülikoolilinnaku elektrivõrk

Olemasolevate mõõtmistulemuste ja võrgu andmete (2011 a.) põhjal arvatud trafode ja kaablite koormused kilovattides ja koormatus protsentides on toodud all olevates tabelites 1.1 ja 1.2. Kõige vähem on koormatud energeetikamaja alajaamas 784 olev trafo number 1 (11,84%) ning teise (infotehnoloogiateaduskond) ja kolmanda (ehitusteaduskond) korpuse vahel olevas alajaamas 510 olevad trafod (15,5%). Enim on koormatud viienda (mehaanikateaduskond) ja kuuenda (üliõpilasorganisatsioonid) korpuse vahel olevas alajaamas 1212 trafo number 1 (51,05%). Koostatud *DIgSILENTi* mudelis on igas 6/0,4 kV alajaamas töös ainult üks trafo.

Kaablite koormatust ei saa aga päris adekvaatselt hinnata, kuna alajaama 4564 (IT-maja) ning 568 (ühisalamud) koormuse kohta puuduvad täpsed andmed. Eeldada võib siiski, et kaablite koormatus on ka puuduvate tarbimiste lisades suhteliselt väike ning jääb kõikjal alla 50%.

*Tabel 1.1. TTÜ linnaku trafod ja nende koormused*





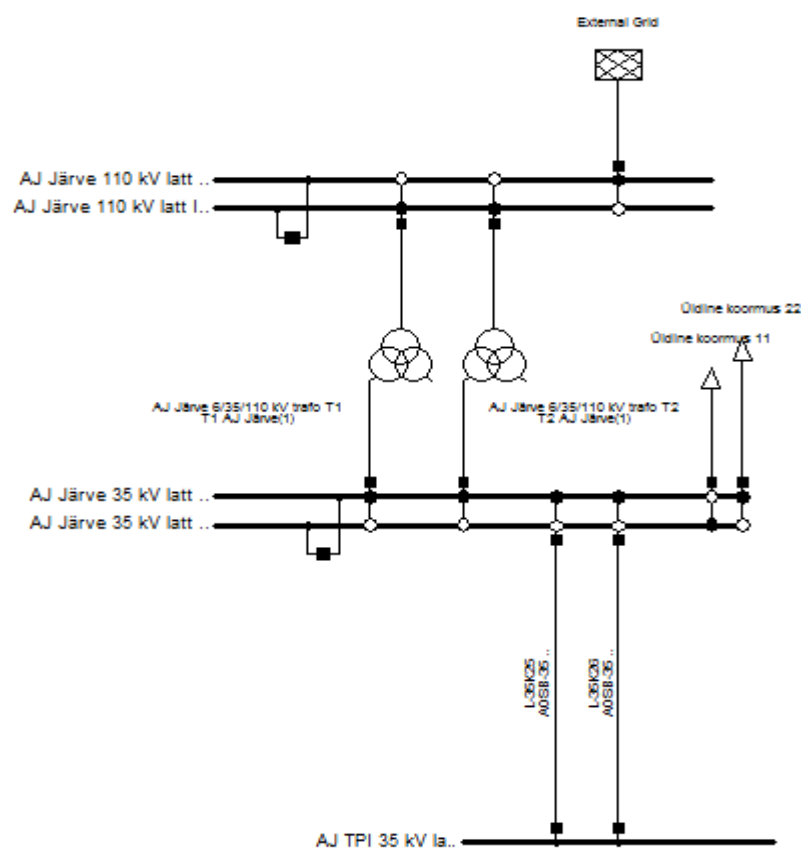




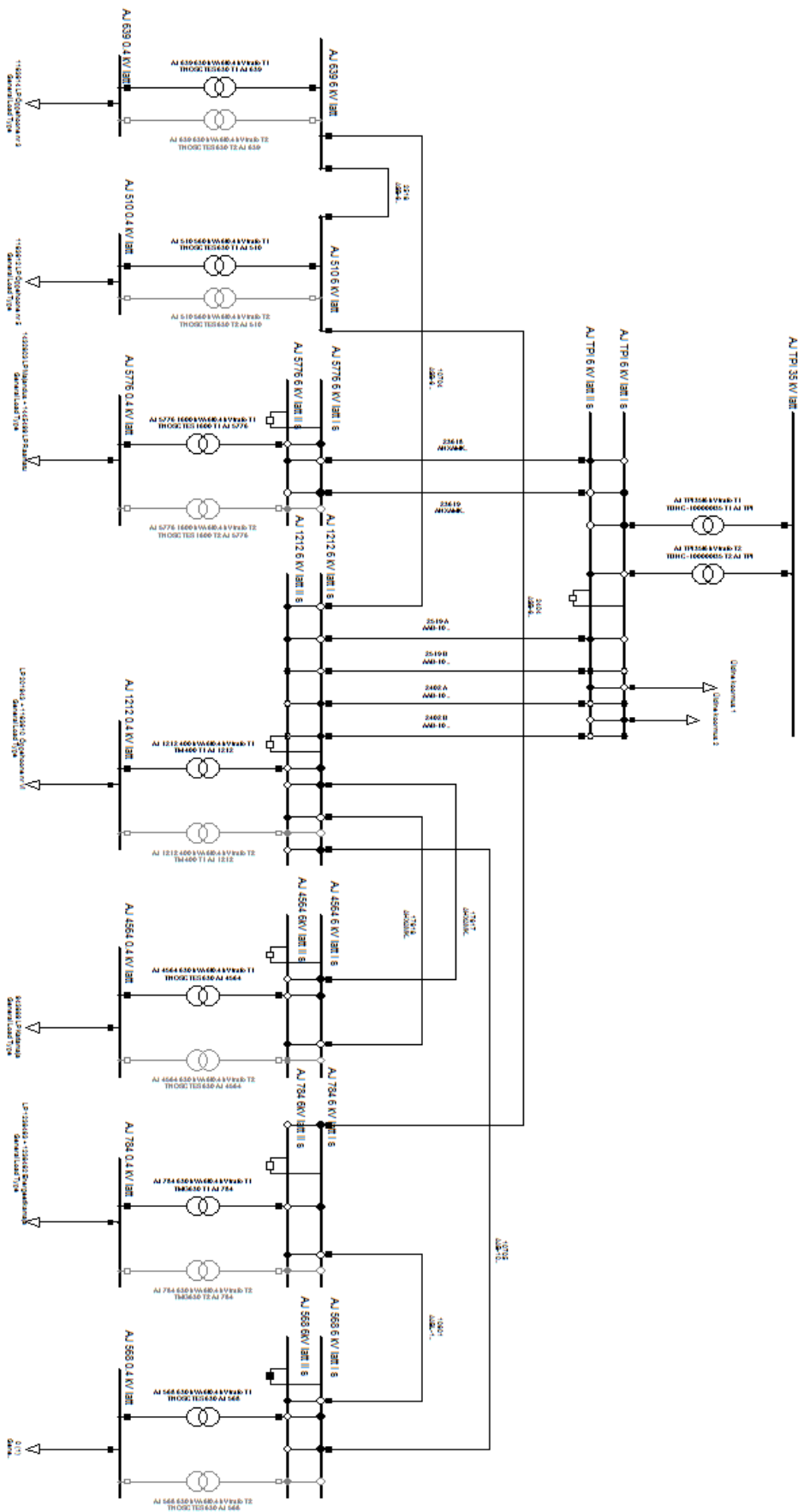
## 1.6 Elektriautode modelleerimine tarkvaraga DIgSILENT

Tarkvaraga *DIgSILENT PowerFactory* on antud uurimuses koostatud kaks võrguskeemi, milles on uuritud võimsusvoogusid, mida elektriautod teoreetiliselt võiksid põhjustada. Esimene skeem on koostatud TTÜ Mustamäe ülikoolilinnaku andmete põhjal ning teine lihtsustatult nii, et oleks esindatud kõik pingeklassid ülekandevõrgust kuni madalpinge tarbijani.

Esimesel juhul on võrgus kujutatud kõik linnaku alajaamad ning elektrivõrk kuni Järve 110/35 kV alajaamani. Järve 110/35 kV alajaamast järgmine objekt on TPI 35/6 kV alajaam ning seejärel seitse ülikoolilinnaku 6/0,4 kV alajaama (Joonis 1.9 ja Joonis 1.10).



Joonis 1.9. TTÜ ülikoolilinnaku võrgu ülekandevõrgupoolne osa



Joonis 1.10. TTÜ ülikoolilinnaku võrgu jaotusvõrgupoolne osa

### 1.6.1 Võimsusvood TTÜ ülikoolinnakus

Antud uurimuses on kasutatud ülikoolilinnaku koormustena olemasolevaid tarbimise andmeid (variant ONO - on nagu on) ning teoreetilisi koormusi suurusjärgus 25%, 50%, 75% ja 100% trafode võimsusest igas alajaamas. Esimene variant (ONO) ning teoreetiline 25% andsid kokku ligikaudu võrdväärse võimsuse. Järgmised variandid (50%, 75% ja 100%) vastavad ülikoolilinnakusse ligikaudu 100, 200 ja 300 lisanduva elektriauto koormusega.

Ülejäänud võrgu (Järve 110/35 kV ja TPI 35/6 kV alajaamade) koormusteks on võetud teoreetiliselt 50% ja teisel juhul 75% trafode võimsusest. Elektriautode lisanduvad teoreetilised koormused on jagatud võrdselt kõigi linnaku alajaamade vahel.

Tabelist 1.7 on näha, et ülejäänud võrgus on ilma TTÜ ülikoolilinnaku koormusteta esialgselt trafod koormatud 50% ulatuses, lisanduvad koormused linnakust olulisi muutusi pingetes kaasa ei too. Tabelis on **rasvaselt tähistatud** tulemused kajastavad pinge muutus enam kui 2%. Üle 5% ei muutu pinge ühelgi juhul. Olukorras, kus 6/0,4 kV alajaamades on töös mõlemad trafod, on pingelang veelgi väiksem saadud näidetest. Pingelang sõltub nii koormusest, lattide ühendusest alajaamas kui ka võrgu tugevusest ehk kaablite ristlõigetest ja trafode võimsusest.

*Tabel 1.7. Pinged AJ lattidel TTÜ linnaku mudelis 50% koormusega ülejäänud võrgus*

Tabelist 1.8 on toodud tulemused, juhul kui ilma TTÜ ülikoolilinnaku koormusteta o ülejäänud võrgus esialgselt trafod koormatud 75% ulatuses. Sellises olukorras esineb pinge muutust üle 5% (märgitud punasega) ainult juhul, kui linnaku trafode koormus on ligikaudu 100%.

*Tabel 1.8. Pinged AJ lattidel TTÜ linnaku mudelis 75% koormustega ülejäänud võrgus*



Lähtuvalt elektriautode aktiivkoormusest ning eeldades, et kogu ülejäänud võrgus rohkem koormusi ei esine, selgub modelleerimistulemustest, et elektriautosid võib 0,4 kV poolele ühendada kogu trafo võimsuse ulatuses. Olenemata 0,4 kV ja 10 kV liinide pikkusest ei avalda see kõrgema pingega võrgus mingit mõju.

## **1.7 Elektriautode koormuse modelleerimine tarkvaraga DlgSILENT arvestades laadimisvoolu kuju**

Käesolevas punktis on toodud elektriautode modelleerimise tulemused kasutades elektriauto modelleerimiseks reaalseid voolukõveraid. Reaalne elektriauto laadimisvool erineb puhtast siinuselisest voolust, mida kajastavad eelnevad tulemused, kõrgemate harmoonikute sisalduse poolest. Kasutatud laadimisvoolu kõver (Joonis 1.3) on kirjeldatud eelnevates peatükkides. Mudelis on kasutatud lisaks kõrgemate harmoonikute vooluamplituudidele ka harmoonikute voolude nurkasid. Arvestatud on ainult ühte tüüpi elektriautodega, mille mõõtmine TTÜs võimalikus osutus. Kõik ülejäänud koormused valiti 6/0,4 kV trafode võimsusest 25% ning arvestades, et töös on ainult üks alajaama trafo kahest. Erandina valiti TPI ja Järve alajaama lisanduvateks koormusteks 50% nende trafode võimsusest.

### **1.7.1 Pingemoonutused elektriautodest TTÜ ülikoolilinnakus**

Modelleerimine TTÜ ülikoolilinnaku mudelis tehti kuues erinevas variandis, kus igäühes muudeti elektriautode arvu ja/või nende ühendust erinevatesse faasidesse. Erinevate variantide eesmärgiks oli välja selgitada elektriautode erineva hulga, nende paiknemisest ja ühendusviisidest tulenevad muutused võrgus. Modelleeritud variantide sisu on selgitatud järgnevas tabelis (Tabel 1.10).

*Tabel 1.10. TTÜ linnakus modelleerimisel kasutatud laetavate elektriautode variandid*

Minimaalselt ühendati võrku korraga 3 ning maksimaalselt 270 elektriautot. Esimeses ja teises variandis elektriautode arvuks valitud minimaalne. Järgnevates variantides on elektriautode arvud faasi kohta ligilähedaselt maksimaalsed, mida trafo võimsust silmas pidades on võimalik võrku ühendada.

Modelleerimistulemused pingemoonutuste (*THD*) kohta alajaama lattidel on toodud tabelis 1.11. Kõik moonutused on esitatud faasi A kohta. Oranži värviga märgitud tulemused näitavad, et pinge moonutus on rohkem kui 0,01%. Punane värv näitab, et pinge moonutus on suurem kui 0,1% ning roheline, et pinge moonutus jääb alla 0,001%.

*Tabel 1.11. Pingemoonutused (THD) alajaamade lattidel*

Tulemustest selgub, et suuremad moonutused pingekujus tekivad kui elektriautod on ühendatud samasse faasi. Antud asjaolu avaldub eriti selgelt variantide 5 ja 6 tulemsute võrdlusest, kus ühes on 270 ja teises vastavalt 90 autot. Suurem moonutus väiksema autode arvu juures tulenevad sellest, et koormuse jaotamisel faaside vahel on need sümmeetrilised ning osa kõrgematest harmoonikutest sumbuvad.

Uuringu tulemused näitavad, et ainuüksi elektriautode koormus suuri pingemoonutusi ülekandevõrgus kaasa ei too. Pingemoonutuse väärtus (*THD*) jäi kõikides vaadeldud variantides nii 35 kV kui ka 110 kV elektrivõrgus alla 0,01%. Maksimaalseks moonutuse väärtuseks oli 0,008%, mis ilmnes variandi number 5 korral.

Samas alajaamas lattidel esinevate moonutuste väärtuste erinevus on tingitud liinide, trafode ja lattide omavahelistest ühendustest ning talitlusest. Lisaks tuleb märkida, et koostatud mudelis olid ainsateks reaalse voolukujuga tarbijateks elektriautod ning ülejäänud koormused esinesid kui puhast siinuseelist kuju tarvivad aktiivvõimsused. Teistest võrguosadest tulenevaid pingemoonutusi antud uurimuse käigus ei modelleeritud.















Madalpingevõrgus esinevate pingemoonutuste (*THD*) väärtused ulatuvad mõlemal juhul kõrgele (ligikaudu 4-5%), ülekandevõrgus aga kirjeldatud elektriautode koormused märgatavaid pingemoonutusi kaasa ei toonud. 35 kV ja 110 kV võrgus jäi pingemoonutuse väärtus mõlema variandi korral alla 0,01%. Sarnaselt eelnevale TTÜ ülikoolilinnaku mudelile, olid ka antud juhul ainsateks reaalse voolukujuga tarbijateks elektriautod. Mujalt võrgust ilmnevaid pingemoonutusi antud juhul ei modelleeritud. Tulemustest selgub, et mõnevõrra suuremad moonutused pingekujus tekivad juhul, kui elektriautod on ühendatud ainult ühte faasi, seda nii 7 kui ka 21 auto korral. Suuremad moonutuse väärtused väiksema autode arvu korral tuleneb asjaolust, et koormuse jaotamisel faaside vahel on see sümmeetriline ning osa kõrgematest harmoonikutest sumbuvad.

#### **1.7.4 Kõrgemad harmoonikud elektriautodest lihtsas võrgus**

Järgnevalt on toodud kõikide vaadeldud variantide kõrgemate paaritute harmoonikute protsentuaalne sisaldus pinge kujus kuni 49nda harmooniku järguni. Sarnaselt eelnevale pole ka lihtsas võrgus paarisarvulisi harmoonikuid eraldi välja toodud, kuna nende väärtused on tunduvalt madalamad võrreldes paaritute harmoonikutega.

#### **Variant LI**

Juhul, kui võrku on ühendatud 21 elektriautot, mis on võrdselt jaotatud erinevate faaside vahel (A,B,C), on pingemoonutused 0,4 kV võrgus märkimisväärselt suured. Jooniselt (Joonis 1.23) on näha, et autode laadimisprotsess avaldab märkimisväärselt lokaalses mõju 0,4 kV võrgus, kuid kõrgematele pingetele edasikanduvad kõrgemad harmoonikud jäävad tagasihoidlikuks.

## **Variant LII**

Juhul, kui võrgus on ühes faasis (A) ühendatud 7 elektriautot, on pingemoonutused 0,4 kV võrgus märkimisväärsed. Tulemustest (Joonis 1.24) on näha, et autode laadimisprotsess avaldab arvestavat mõju just lokaalses 0,4 kV võrgus.

*Joonis 1.24. Paaritud kõrgemad harmoonikud teise varianti korral lihtsas võrgus*

Moonutuste väärtused antud variandis on suuremad kui esimese variandi korral, kus autosid oli kolm korda rohkem. Ka antud juhul jäävad kõrgematele pingeastmetele edasikanduvad harmoonikute väärtused märkamatuks.

### **1.8 Kokkuvõte**

Elektriautode laadimisest tulenevalt eeldatakse üha suurenevat koormust elektrivõrgule. Seda eelkõige jaotusvõrkude osas, kus võrgu nõrgemates piirkondades võivad ilmned ka teatavad probleemid. Läbiviidud uurimustöö tulemuste põhjal ei osutu elektriautode tarbimisest tingitud uute tootmisvõimsuste prognoosimine vajalikuks. Lisaks saab märkida, et elektriautode laadimine ülekandevõrgus probleeme ei põhjusta.

Elektriautode areng algas kõige lihtsamate kontrollimata juhtimissüsteemidega ühefaasiliste alalditega laadijatest. Tänapäevased laadijad on edasi arenenud ning nende poolt tarbitav vool tekitab oluliselt väiksemal määral kõrgemaid harmoonikuid. Parimad laadijad on võimelised enam kui 50% võimsuse juures voolukuju moonutuse väärtuse hoidma alla 5%.

Modelleerimistulemused TTÜ ülikoolilinnaku näitel näitavad, et aktiivkoormuste juures ja laetavate autode võrdsel jagunemisel alajaamade vahel ei ilmne probleeme kuni ligikaudu 200 elektriauto korraga laadimisel. Võrgu madalamatel koormustel ei ilmne probleeme ka ligikaudu



300 elektriauto laadimisel ning kui igas 6/0,4 kV alajaamas lülitada tööle mõlemad trafod on see arv veelgi suurem. Arvestades ka elektriautode laadimisvoolus sisalduvaid kõrgemaid harmoonikuid, ei tohiks ligikaudu 300 elektriauto laadimine pingekvaliteedis olulisi muutusi kaasa tuua. Ainult elektriautodest tulenevad pingemoonutused 0,4 kV võrgus jäävad alla 1%. Arvesse tuleks võtta aga ka võrgus esinevaid muid ebalineaarseid koormusi ning sellisel juhul võivad moonutuste väärtused oluliselt kasvada. Uurimustöös tehtud arvutused näitavad aga, et ka sellisel juhul jäävad moonutuste väärtused ülekandevõrgus märkamatuks (alla 0,01%). Lisaks elektriautode arvule võrgus tuleb pingemoonutuste korral arvestada ka erinevat tüüpi laadijatega ning seetõttu erinevate harmoonikutega laadimisvooludes. Elektriautode koormuse kõrval on oluline ka teiste koormuste suurused ja nende harmoonikute sisaldus.

## 1.9 Kirjandus

- [1] A. Foley, I. Winning ja B. Ó Gallachóir, „State-of-the-Art in Electric Vehicle Charging Infrastructure,“ *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010.
- [2] New York ISO, „Alternate route: electrifying the transportation sector. Technical report,“ 2009.
- [3] KEMA Inc. and ISO/RTO Council, „Assessment of plug-in electric vehicle integration with ISO/RTO systems,“ 2010.
- [4] Transport & Mobility Leuven, „Emissions of road traffic in Belgium,“ 2006.
- [5] Die Bundesregierung, „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung,“ 2009.
- [6] L. Kütt, E. Saarijärvi, M. Lehtonen, H. Mölder ja J. Niitsoo, „A Review of the Effects of Electric Vehicle Charging on Distribution Network Operation and Power Quality,“ *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2013*, Kaunas, Lithuania, 2013.
- [7] K. Schneider, C. Gerkenmeyer, M. Kintner-Meyer ja R. Fletcher, „Impact Assessment of Plug-In Hybrid Vehicles on Pacific Northwest Distribution Systems,“ *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2008.
- [8] T. J., A. Götz ja W. Schufft, „Electric vehicles and their effects in low-voltage grids,“ *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO)*, 2011.
- [9] A. Broy ja C. Sourkounis, „Influence of charging electric vehicles and on the quality of the distribution grids,“ *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, 2011.

- [10] K. Clement-Nyns, E. Haesen ja J. Driesen, „The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid,“ *IEEE Transactions on Power Systems*, kd. 25, nr 1, pp. 371 - 380, 2010.
- [11] P. Richardson, D. Flynn ja A. Keane, „Impact Assessment of Varying Penetrations of Electric Vehicles on Low Voltage Distribution Systems,“ *IEEE PES General Meeting*, 2010.
- [12] J. Meyer, S. Hahle, P. Schegner ja C. Wald, „Impact of electrical car charging on unbalance in public low voltage grids,“ *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, 2011.
- [13] IEC, „IEC 61000-2-2:Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.,“ 2002.
- [14] F. Shahnia, A. Ghosh, G. Ledwich ja F. Zare, „Voltage Unbalance Sensitivity Analysis of Plug-in Electric Vehicles in Distribution Networks,“ *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2011.
- [15] S. Berisha, G. Karady, R. Ahmad, R. Hobbs ja D. Karner, „Current Harmonics Generated By Electric Vehicle Battery Chargers,“ *Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1996.
- [16] F. Musavi, M. Edington, W. Eberle ja W. Dunford, „Evaluation and Efficiency Comparison of Front End AC-DC Plug-in Hybrid Charger Topologies,“ *IEEE Transactions on Smart Grid*, kd. 3, nr 1, p. 413 – 421, 2012.
- [17] L. Kütt, E. Saarijärvi, M. Lehtonen, H. Mölder ja J. Niitsoo, „Current Harmonics of EV Chargers and Effects of Diversity to Charging Load Current Distortions in Distribution Networks,“ *Proceedings of 2013 International Conference on Connected Vehicles & Expo*, Las Vegas, USA, 2013.
- [18] L. Kütt, E. Saarijärvi, M. Lehtonen, H. Mölder ja J. Niitsoo, „A Review of the Harmonic and Unbalance Effects in Electrical Distribution Networks due to EV Charging,“ *Conference Proceedings of the 2013 12th International Conference on Environmental and Electrical Engineering*, 2013.
- [19] P. Staats, W. Grady, A. Arapostathis ja R. Thallam, „A Statistical Method for Predicting the Net Harmonic Currents Generated by a Concentration of Electric Vehicle Battery Chargers,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, kd. 12, nr 3, p. 1258 – 1266, 1997.

- [20] European standard, „EN 50160: Voltage Characteristics in Public Distribution Systems,“ 2010.
- [21] R. Bass, R. Harley, F. Lambert, V. Rajasekaran ja J. Pierce, „Residential Harmonic Loads and EV Charging,“ *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001.
- [22] V. Monteiro, H. Goncalves ja J. Afonso, „Impact of Electric Vehicles on Power Quality in a Smart Grid Context,“ *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, 2011.
- [23] Electric Power Research Institute, „Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles,“ 2007.

## 2. Ülekandevõrgus toimuvate katkestuste mõju elektri- tode laadimistsüklile

### 2.1 Elektriauto ühendusviisid ja laadimise moodused

Elektriautode laadimise võimalused ning elektripistikute tüübid ja neile esitatavad nõuded on määratud IEC 62196 standardiga. Nimetatud standard põhineb IEC 61851 standardil, milles on kirjeldatud mehhanismid, mis ei lase elektriseadet pingestada ilma, et temaga oleks ühendatud elektrisõiduk. Samuti on IEC 61851 standardis välja toodud kohustus tagada, et laadimisseadmega ühendatud sõiduk ei oleks võimeline liikuma [1].

IEC 62196 nõuetele vastavate laadimisseadmete puhul ei suleta vooluringi, kui seade ei tuvasta IEC 61851 nõuetele vastavat signaali elektrisõiduki ühendatuse kohta. Üldjuhul piiratakse laadimisvool automaatselt 16 A-ni, välja arvatud juhul, kui tuvastatakse laadimismooduse signaal, mis lubab kasutada suuremat voolu. Elektrisõiduki laadimismoodused jaotatakse neljaks [1], [2]:

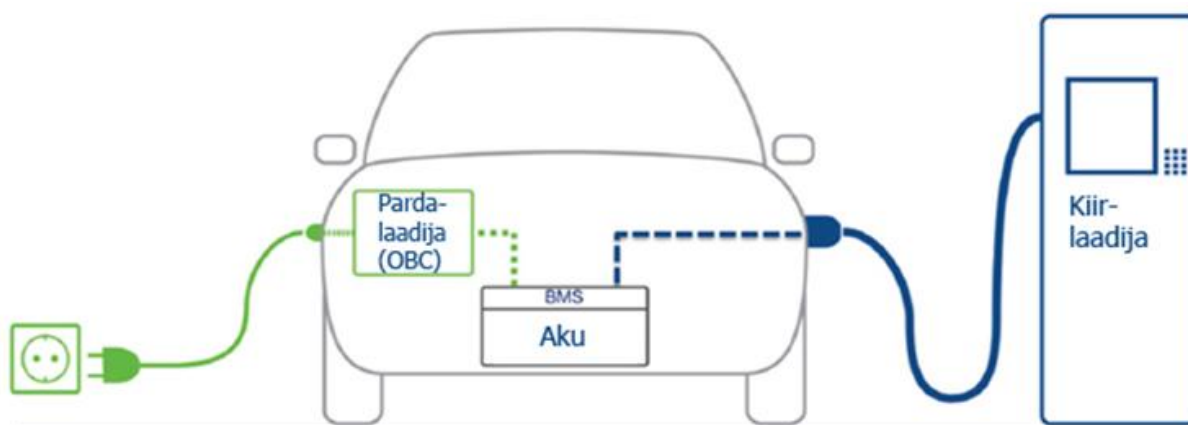
- Aeglane laadimine kodumajapidamistüüpi pistikupesast, kus elektriauto ühendatakse vahelduvvooluvõrku ühe- või kolmefaasilise ühendusega, kus pinged ei tohi ületada vastavalt 250 ja 480 V.
- Aeglane laadimine kodumajapidamistüüpi pistikupesast koos kaablisese kaitseadmega. Elektriauto ühendatakse vahelduvvooluvõrku samade pingepiirangutega kui esimese mooduse puhul, kuid kasutatakse kuni 32 A pistikuid kaitsemaandusega, millel on eraldi juhtkontaktid, mis lubavad kasutada kõrgemat voolu.
- Aeglane või poolkiire laadimine, mille korral kasutatakse spetsiifilist elektrisõiduki pistikupesast, mille faasivool ei ületa 63 A ja millele on lisatud kontroll- ja kaitseaparatuur.
- Kiire laadimine, mille korral kasutatakse elektriauto välist laadijat, kus elektriautot toidetakse otse alalisvooluga.

Esimese kolme laadimismooduse korral toidetakse elektriautot vahelduvvooluga, mis muudetakse akude laadimiseks alalisvooluks elektrisõiduki siseselt, kasutades selleks elektriauto pardalaadijat (*OBC – On Board Charger*). Loetelus toodud viimase laadimismooduse korral toidetakse elektrisõiduki akusid kolmefaasilise alalisvooluga, kasutades pardavälist laadimisseadet (nn kiirlaadija). Tabelis 2.1 on toodud kokkuvõtvalt erinevate laadimismooduste lubatavad piirid.

Tabel 2.1. Standardi IEC 61851 laadimistüübid

Laadimismoodus	Maksimaalne vool faasi kaupa	Laadimiseks kuluv aeg	Sõiduki akulaadija tüüp
Moodus 1	16 A	4...8 h	<i>On-Board</i>
Moodus 2	32 A	2...4 h	<i>On-Board</i>
Moodus 3	63A	1...2 h	<i>On-Board</i>
Moodus 4	400 A DC	5...30 min	<i>Off-Board</i>

Mõlema laadimismooduse võimaldamiseks peab elektrisõidukil olema eraldi nii vahelduvvooluga kui ka alalisvooluga laadimise pistikupesad. Laadimisprotsessi iseloomu määrab akude juhtimissüsteem ehk *BMS (Battery Management System)*. Joonisel 2.1 on kujutatud elektriauto laadimine tava- ja kiirlaadijaga.

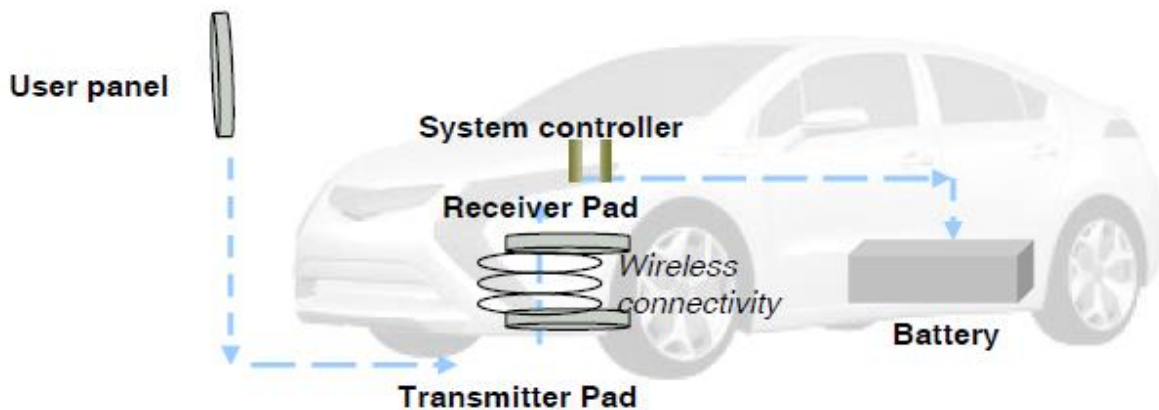


Joonis 2.1. Laadimiseks kasutavate seadmete ja ühenduste põhimõtteskeem [1]

Seega võib öelda, et tavalaadijaga laadides on elektriauto puhul tegemist ühefaasilise tavatarbijaga ja kiirlaadijaga laadides kolmefaasilise tavatarbijaga. Alternatiiviks otsesele laadimisele on väljaarendamisel induktiivlaadimise lahendus. Viimane on juba kasutusel väiksemate elektronikaseadmete akude laadimisel. Selle laadimissüsteemi põhimõte on sarnane trafo tööpõhimõttele, kuid mähised on üksteisest eraldatud. Elektriautode laadimise puhul on primaarmähis paigaldatud statsionaarselt ja sekundaarmähis on paigaldatud autosse (Joonis 2.2).

Aruandes [3] on välja toodud kaks erinevat võimalust – staatiline ja dünaamiline laadimissüsteem. Staatilise laadimise korral on tegemist olukorraga, kus primaarmähis on paigaldatud autoparklasse või mõnda sarnasesse kohta, kus auto seisab pikemat aega.

Dünaamilise laadimissüsteemi korral on lühem teelõik või pikem tee osa varustatud laadimissüsteemiga, millest üle sõites suudab auto oma akut laadida või tarbida energiat otse, ilma seda vahepeal salvestamata.



*Joonis 2.2. Näidis induktiivlaadimissüsteemist [4]*

Dünaamilise laadimissüsteemi paigutamiseks on kavandatud erinevad asukohti, kus autod läbi-  
vad antud teelõiku aeglaselt, näiteks bussipeatustes, valgusfooride ja muude liiklust aeglusta-  
vate liiklusmärkide juures jm. Eesmärgiks on võimaldada kõigil autodel, kes laadimisee lõigul  
asetsevad korraga laaduda.

Käesolevas aruandes keskendutakse vaid tavalaadijaga laadimise uurimisele, kuna nende  
üheaegsus võrreldes kiirlaadijatega on suurem ja mõju süsteemist tulenevale häiringule on kok-  
kuvõttes suurem. Samuti tuleb arvestada tavalaadimise puhul pikema laadimisajaga ning suu-  
rema tõenäosusega, et häiring just siis aset leiab.

## 2.2 Lühiste olemus ja tekkepõhjused

Lühiseid võib elektrisüsteemis esineda erinevatel põhjustel. Peamisteks häiringute põhjustajateks on völgulöögid, seadmete rikked või vöärtoimimised, inimlikud eksimused ja liigkoormused. Lühis kujutab endast olematu või vöga väikese takistusega ühendust vooluahelas kahe või rohkema tavaolukorrast erineva potentsiaaliga punkti vahel. Lühise tulemusena toimub elektriահela takistuse järsk vähenemine, millega kaasneb voolu ohtlik suurenemine ja pinge alane-mine. Erilist tähelepanu tuleb pöörata voolu ja pinge muutumisele lühisekoha lähedal, kus mõju on kõige suurem [4].

Tulenevalt rikkega kaasatud faaside arvust ja maaühenduse vöimalikkusest, vöib lühised jagada neljaks erinevaks tüübiks:

- 3-faasiline lühis  $F^{(3)}$ ;
- 2-faasiline lühis  $F^{(2)}$ ;
- 2-faasiline maalühis  $F^{(1,1)}$ ;
- 1-faasiline lühis  $F^{(1)}$ .

Kolmefaasilise lühise korral on tegemist sümmeetrilise lühisega, kus kolme faasi lühistamisel tekib lühisepunktis nullpotentsiaaliala ka ilma maaühenduseta. Sellest tulenevalt puudub kolmefaasilise lühise korral maaühenduse olemasolu olulisus. Ülejäänud lühiste puhul on tegemist asümmeetriliste lühistega. Asümmeetrilised lühised haaravad vaid osa faase ning muudavad kolmefaasilise süsteemi lühisekohas asümmeetriliseks. Rikke käigus vöib lühise tüüp muutuda ning ühe- ja kahefaasilised lühised vöivad areneda kolmefaasiliseks lühiseks [4].

Lühisest tuleneva voolu ja pinge muutumine lühisekoha lähedal häirib oluliselt tarbijaid. Pinge alanemisest vöivad tekkida seadmete ajutised katkestused. Lisaks vöib suur vool põhjustada elektrijuhtide liigkuumenemist ja tekitada juhtide vahel ohtlikke mehaanilisi jõudusid. Liigkuumenemine rikub isolatsiooni, vähendab mehaanilist vastupidavust ja seade vöib süttida [4].

Lühiste põhjustajate mõju on tihti lühiajaline ning häiringukoha isoleerimise asemel toimub automaatne taaslülitus (*ATL*). *ATL* on energiasüsteemi sidemete ja tarbijate toite automaatne taastamine pärast elektrisüsteemi elemendil esinenud lühise väljalülitamist sama elemendi taaslülitamisel teel. *ATL* protsessi viivad ellu taaslülitusautomaadid (*TLA*) ning õhuliinidel peetakse nende edukuseks 60...90%.

Eesti ülekandevõrgus toimuvate katkestuste mõju avaldub kogu elektrivõrgus, olgu selleks siis vilkuv laelamp või televiisori ajutine väljalülitus. Tarbijate väljalülitusest tähtsam on elektri tootmiseseadmete võime taluda lühiseid ja ajutisi pingelange. Kehtiv Eesti Võrgueeskiri §23 määrab, milliste elektrikatkestuste korral peaks generaator ja selle abiseadmed võrgust eralduma ja millal mitte [6]. Laskumata erisustesse võib öelda, et tootmiseseadmed peavad elektrivõrgust välja lülitumata taluma pinge järsku alanemist liitumispunktis 0%-ni nimipingest kuni 0,25 sekundiks. Selle nõudega välditakse olukorda, kus peale igat ülekandevõrgus toimuvat lühist võiks elektri jaam süsteemist eralduda. Aastatel 2005-2009 registreeris Elering AS 110 kV elektrivõrgus kokku 949 riket [7]. Osad riketest on vältimatud piksetabamused või seadmete rikked, kuid mõnede rikete otsesest põhjust on keeruline hinnata. Rikete jaotus on toodud joonisel 2.3.



*Joonis 2.3. 110 kV ülekandeliinide rikete arv tekkepõhjuste kaupa aastatel 2005-2009 [3]*

Oluline on märkida, et määramata rikete (79% rikete üldarvust) puhul toimus 99% protsendil juhtudest liini edukas taaspingestamine [7], mis tähendab, et katkestus on väga lühiajaline. Seega ei sega lühised elektrijaamade normaaltalitlust. Küll aga vajaks käesoleva uurimustöö raames uurimist ülekandevõrgus esinevate lühiste mõju madalpingetarbijatele ehk antud juhul elektriautodele. TTÜ elektroenergeetika instituut on jälginud pingekvaliteeti TTÜ madalpingevõrgus. 2013. aasta detsembris õnnestus salvestada siirdeprotsess, mis suure tõenäosusega oli ülekandevõrgus aset leidnud lühis. Joonisel 2.4 on toodud TTÜ laboris mõõdetud pingeväärsed nimetatud siirdeprotsessi ajal.

Jooniselt on näha, et lühise tõttu on pinge langus olnud ligikaudu 20-70 V. Suurim on pinge langus on olnud teises faasis (joonisel roheline kõver), kus toimus arvatavasti ka maalühis ning pinge langus on olnud ligikaudu 70 V.

### **2.3 Katseseadme põhimõte**

2013. aastal registreeritud arvatava ülekandevõrgu lühise hetkel ei olnud paraku samaaegselt laadimas ühtegi elektriautot, mille laadimistsükli oleks olnud võimalik mõõta. Seetõttu katsetati uurimustöö läbiviimiseks elektriautot eraldi seadmega, mille abil tekitati toitepinge katkestus ning mille mõju ka mõõdeti. Katseseadme põhimõtteline loogikaskeem on toodud joonisel 2.5. Katseseade võimaldab imiteerida toitekatkestusi ühe- kuni kolmefaasilisele tarbijale ning toitekatkestuse pikkus võib olla 0,2 sekundist mõne minutini.

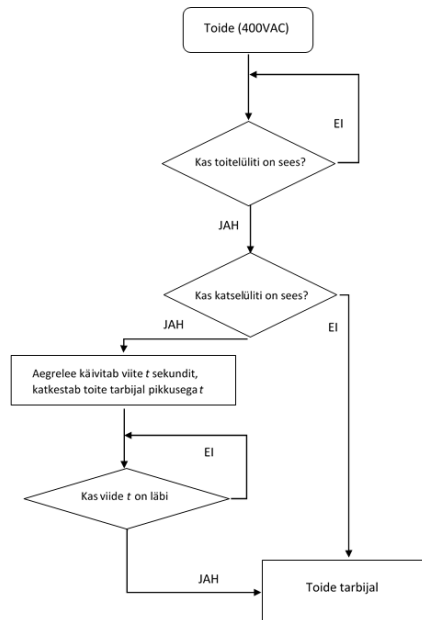
Kontaktor on automaatne- või distantsjuhitav lülitusseade, mis on ette nähtud sisse või välja lülitama normaalset talitusvoolu ja ka ülekoormusvoolu madalpingeahelais. Kontaktor koosneb magnetahelast ja kontaktidest. Antud katseseadme puhul on Kontaktor 1 kolmefaasiline NO-tüüpi (*Normally Open*) ehk tavaolukorras avatud kontaktidega. Kontaktid sulguvad, kui kontaktori magnetahelasse toide lülitada. Kontaktor 2 on ühefaasiline NC-tüüpi (*Normally Closed*) ehk tavaolukorras suletud kontaktidega. Sellisel juhul juhib kontaktor voolu seni kuni kontaktori magnetahelat ei toideta. Aegrelee puhul on tegemist multifunktsionaalse releega, mis antud seadme korral kasutab *Impulse-On* funktsiooni. Erinevateks ajaviite pikkusteks on võimalik kasutada 0,05 s...100 h. Elektrilise turvalisuse tagamiseks on kasutatud automaatkaitselülituid, mis rikete korral reageerivad ning isoleerivad rikkekoha.

Katseseadme (Joonis 2.6) põhimõte seisneb selles, et Lülit 1 sisse lülitamisel juhib Kontaktor 2 voolu Kontaktor 1 magnetimisahelale, mis sulgeb Kontaktor 1 kontaktid ning seejärel juhib Kontaktor 1 voolu. Lülitades sisse Lülit 2 toidetakse aegrelee magnetahelat ja aegrelee on juhtiv eelnevalt määratud ajal. Aegrelee toidab Kontaktor 2 magnetahelat, mille tulemusel Kontaktor 2 kontaktid avanevad. Kontaktor 2 kontaktide avanemisel katkeb Kontaktor 1 toide aegrelee sätte pikkuseks ajaks. Hetkel, mil aegreleega määratud aeg läbi saab kaob toide Kontaktor 2 magnetahelalt ja Kontaktor 1 kontaktid sulguvad. Selliste lülitusprotsessidega simuleeritakse toitekatkestust seadmetel, mis saavad oma toite läbi Kontaktori 1.

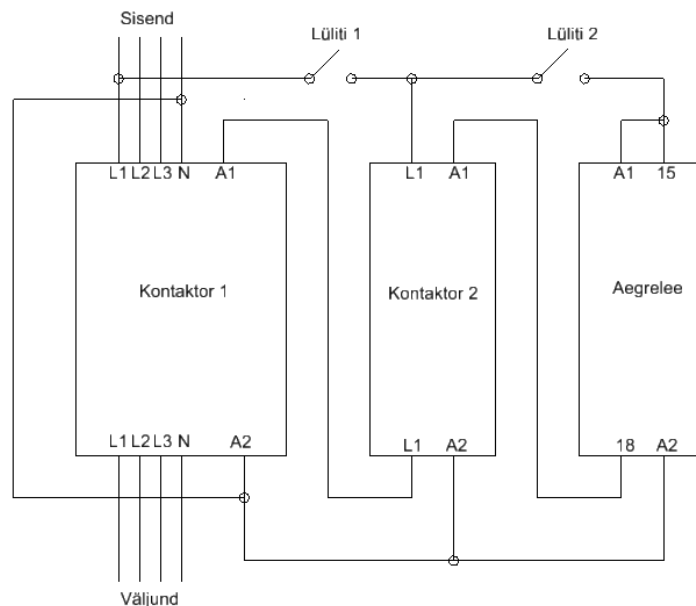
Katseseadmes on kasutatud järgmisi komponente:

- Kontaktor ABB ESB 63-40;
- Kontaktor ABB ESB 20-02;

- Kaitselüliti ABB S201 B16;
- Kaitselüliti ABB S201 B6;
- Aegrelee ABB CT-MFD.



Joonis 2.5. Katseseadme esialgne loogikaskeem



Joonis 2.6. Katseseadme skeem

Antud seadmega viidi laboris läbi elektriautole lühiajaline toitekatkestus vaatamaks, kas elektriautode laadimistsüklile avaldab selline katkestus mõju. Tehtud laborikatsed imiteerivad võrgus esinevaid lühiajalisi katkestusi, mis võivad tarbija elektriseadmeid kahjustada. Laboris õnnestus teha katseid vaid ühe autoga, sest teist tüüpi elektriauto laadija keeldus laboris teadmata

põhjustel laadimast ning auto omanik ei soovinud ka rohkem katseid teha lasta. Katsetulemused on näha järgnevas peatükis etteruttavalt võib öelda, et kahe auto laadimissüsteemis on teadmata erisus, mis ühel juhul lubas laadimist alustada ja teisel mitte.

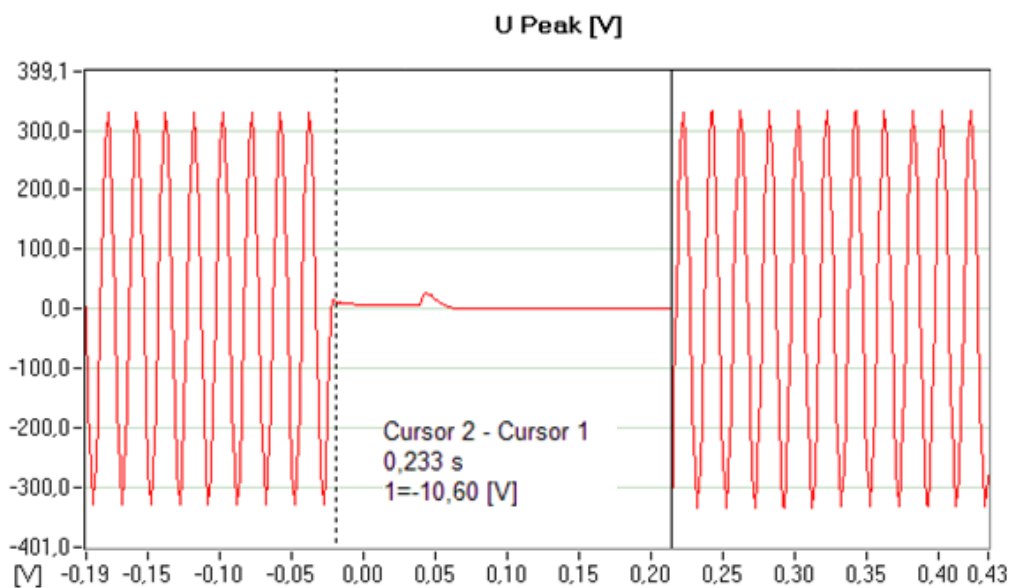
Lühise mõju katsetamiseks seati TTÜ laboris üles skeem, mis koosnes kahest CA 8352 mõõteseadmest, toitekatkestuse katseseadmest ja elektriautost. Labori ülesseade on näha joonisel 2.7.



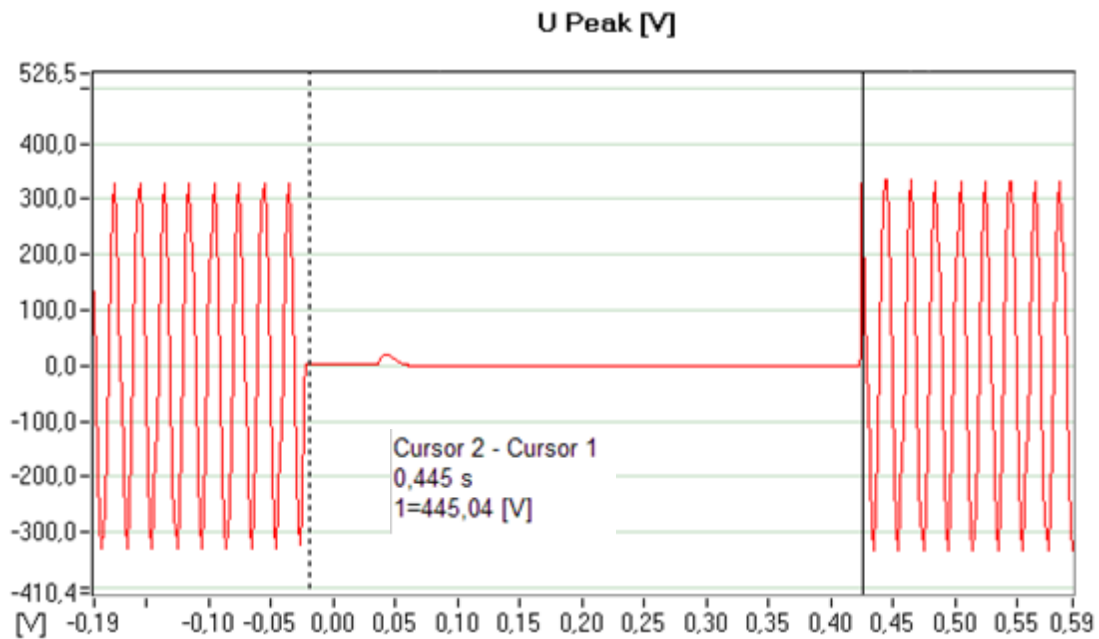
Joonis 2.7. Mõõteseadmed, katseseade ja elektriauto TTÜ laboris

## 2.4 Toitekatkestuse mõju elektriauto laadimistsüklile

Elektriauto laadimistsüklile lühiajalise toitekatkestuse võimaliku mõju hindamiseks viidi TTÜ laboris läbi vastavad katsed elektriautoga. Auto võimalikult väheseks häirimiseks tehti laboris kaks katset, mille kestvuseks oli vastavalt 0,233 ja 0,445 sekundit, mis on toodud joonistel 2.8 ja 2.9. Katkestuse pikkuseks pikemaid aegu ei valitud, kuna pikemad katkestused liigituvad juba püsikatkestuste alla ning sellisel juhul loetaksegi toidet katkenuks ja laadimist ei toimu.

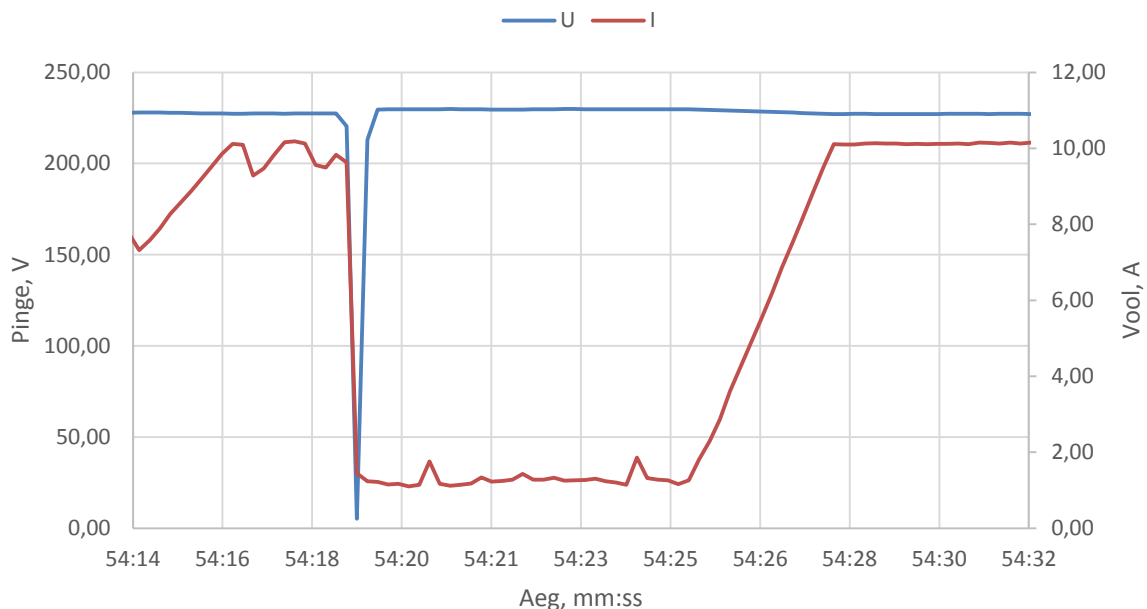


Joonis 2.8. Toitekatkestuse kestvus (0,233 sekundit) ja pinge amplituudväärtused



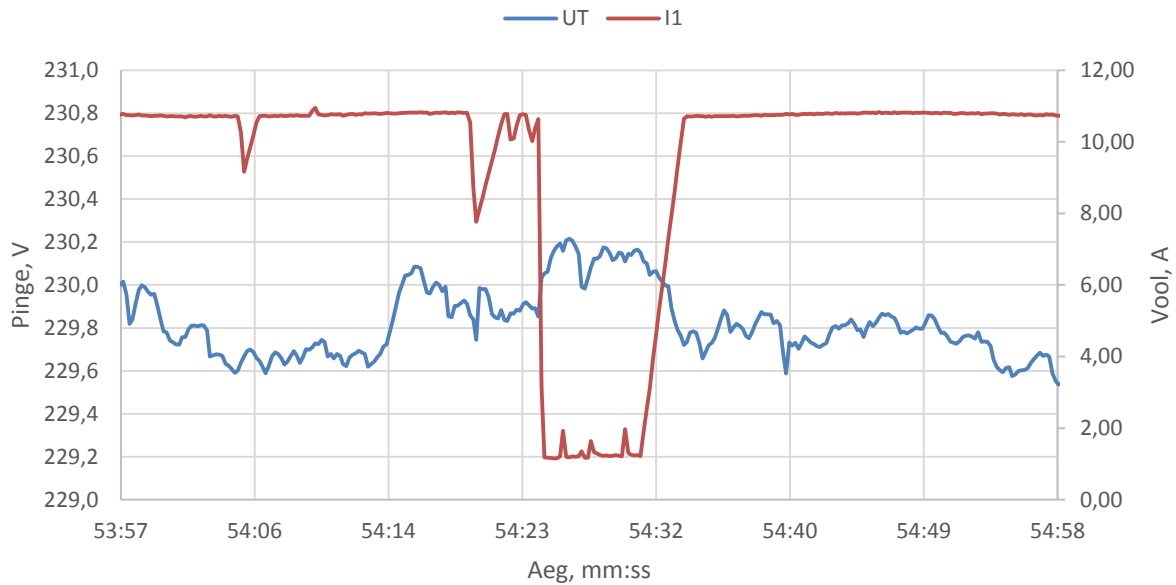
Joonis 2.9. Toitekatkestuse kestvus (0,445 sekundit) ja pinge amplituudväärtused

Laadimised tehti ühefaasilise tavalaadijaga olukorras, kus auto aku oli pooleldi täis ja enne katsetust oli laadimine kestnud 15 minutit. Katsete käigus mõõdeti pinget, voolu, aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsusi nii laadija klemmidel kui ka võrgu poolel. Sellega sooviti salvestada nii lühise kestvus kui ka pinge muutus katkestuse ajal. Laadimisvool väärtuseks oli ligikadu 10 A ja pinge väärtuseks 229 V.

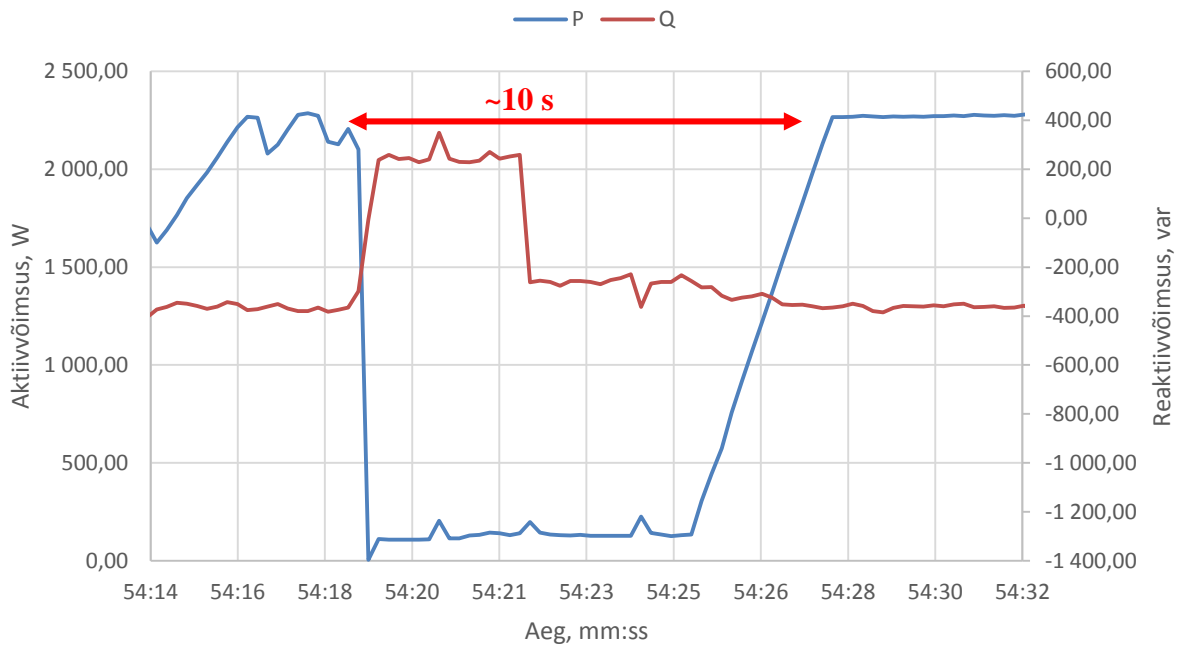


Joonis 2.10. Pinge ja voolu keskvaartused 0,233 sekundilise lühise korral mõõdetuna laadija klemmidel

Joonisel 2.10 on toodud laadija klemmidel mõõdetud pinget ja voolu väärtused 0,233 sekundi-  
 lise katkestuse korral. Jooniselt on näha, et pinget on langenud nulli ja vool on 1 A, mis on antud  
 mõõteskeemi juures mõõteseadme vähim väärtus. Joonisel 2.11 on toodud samad väärtused  
 mõõdetuna toitevõrgu poolelt, kus on näha väikest pingetõusu katkestuse ajal.

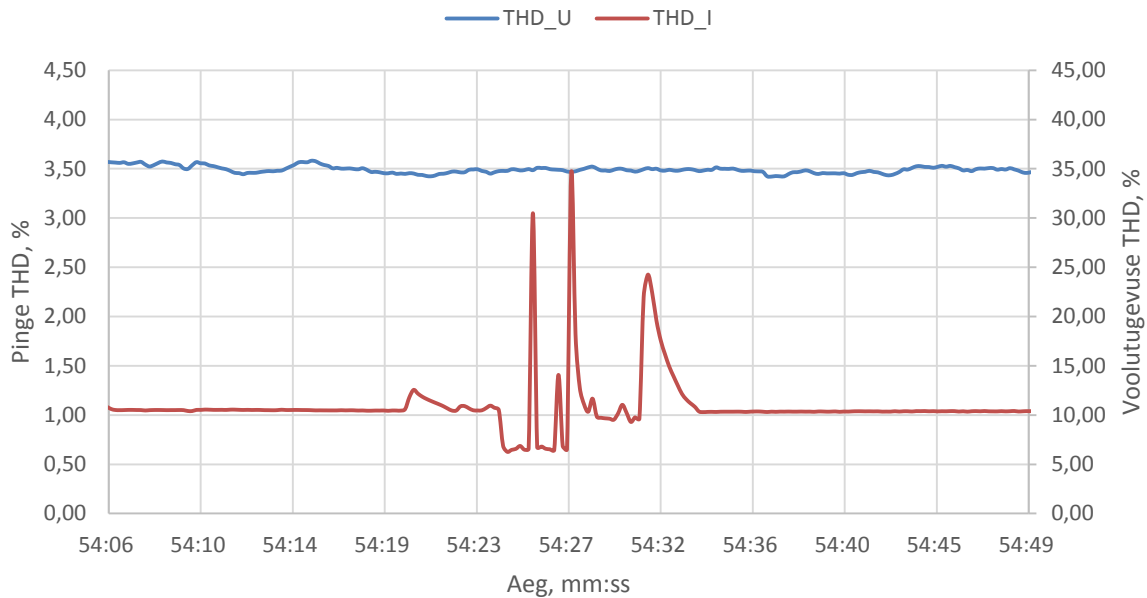


Joonis 2.11. Pinget ja voolu keskvaartused 0,233 sekundilise lühise korral mõõdetuna toitevõrgu-  
 gust



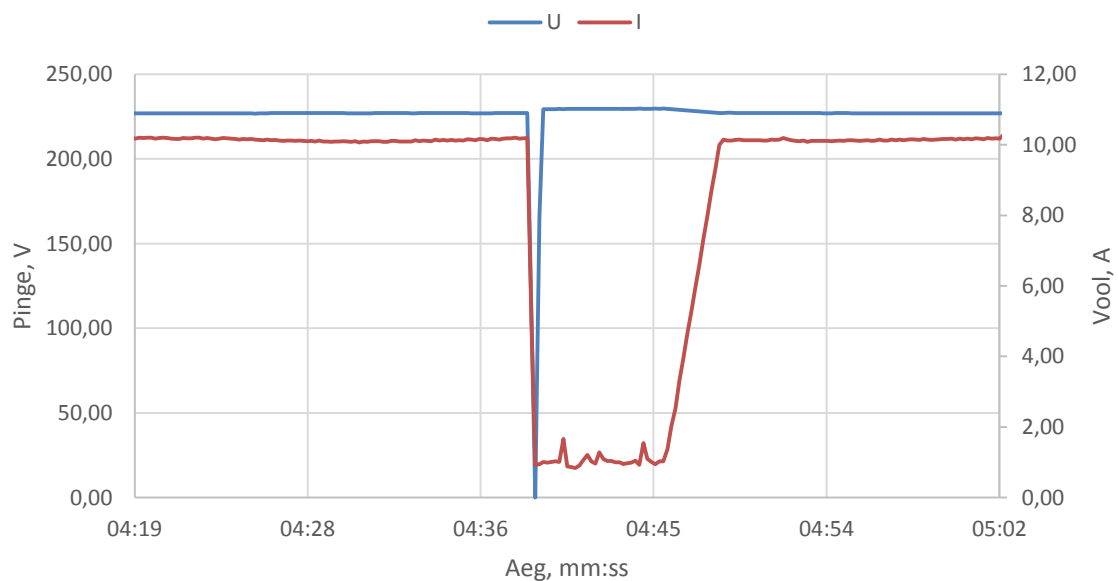
Joonis 2.12. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse keskvaartused 0,233 sekundilise lühise korral

Joonisel 2.12 on toodud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse väärtused 0,233 sekundilise lühise korral ning joonisele on lisatud ka aeg, millal elektriautot ei laetud s.o ligikaudu 10 sekundit. Samalt jooniselt on näha ka, et katkestuse ajal on reaktiivvõimsuse muutus olnud ca 0,6 kVar. Joonisel 2.13 on kujutaud pinge ja voolu THD väärtused 0,233 sekundilise katkestuse korral.



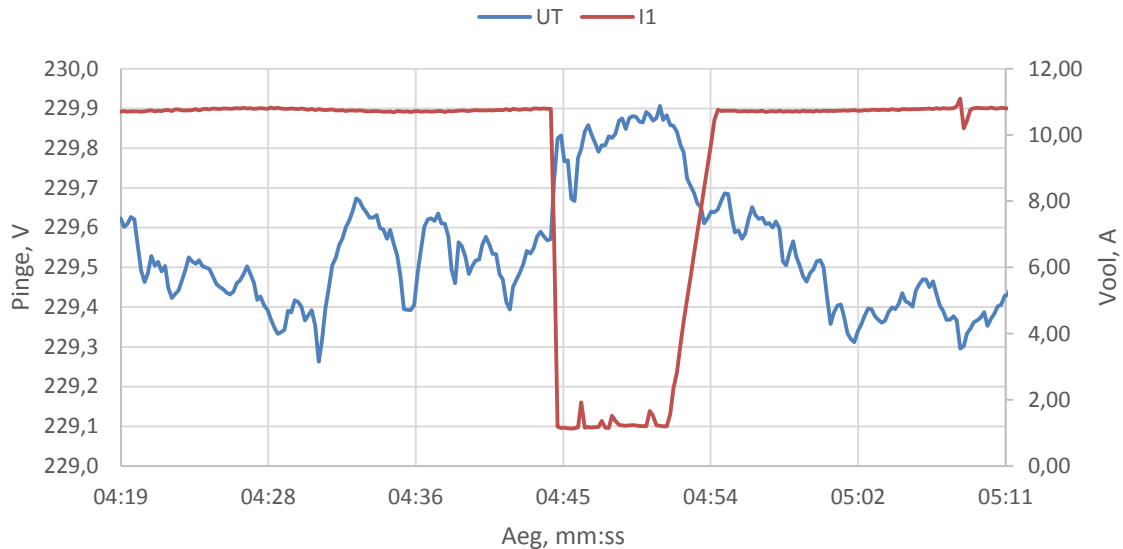
Joonis 2.13. Pinge ja voolu THD väärtused 0,233 sekundilise katkestuse korral.

Joonisel 2.14 on toodud laadija klemmidel mõõdetud pinge ja voolu väärtused 0,445 sekundi- lise katkestuse korral.

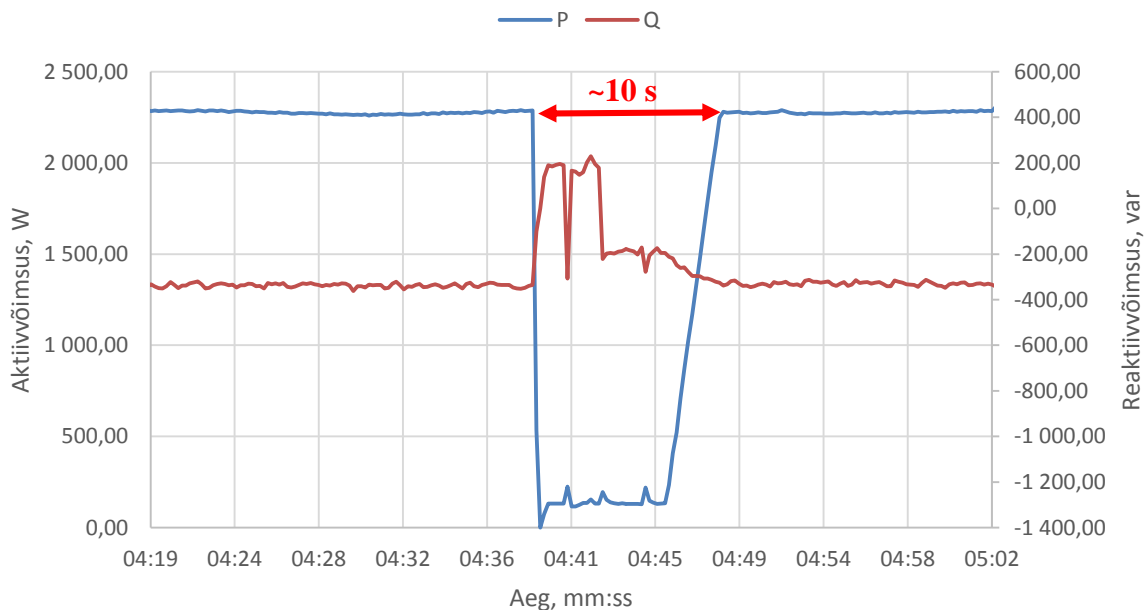


Joonis 2.14. Pinge ja voolu keskväärtused 0,445 sekundilise lühise korral mõõdetuna laadija klemmidel

Joonisel 2.15 on toodud vastavad väärtused mõõdetuna toitevõrgu poolelt. Jooniselt on näha katkestuse ajal aset leidvat väikest pingetõusu (0,3 V). Joonisel 2.16 on toodud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse väärtused 0,445 sekundilise lühise korral ning joonisele on lisatud ka aeg, millal elektriautot ei laetud s.o ligikaudu 10 sekundit. Sarnaselt lühemale katkestuse kestvusele on ka siin näha reaktiivvõimsuse muutust suurusjärgus 0,6 kVar. Joonisel 2.17 on kujutatud pinget ja voolu *THD* väärtuseid 0,445 sekundilise lühise korral.

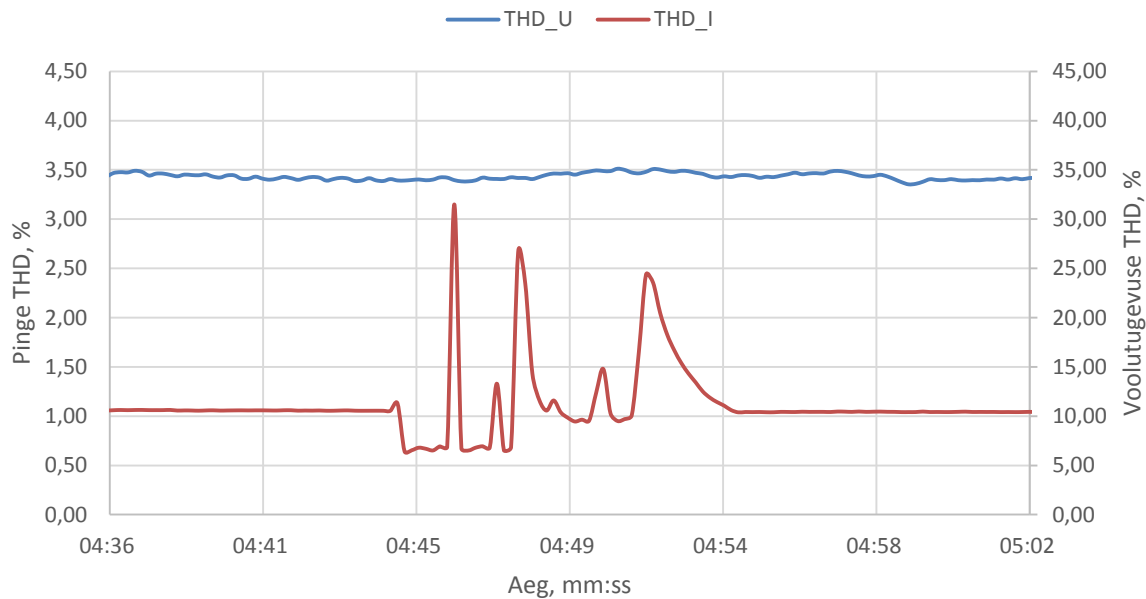


Joonis 2.15. Pinget ja voolu keskvaartused 0,445 sekundilise lühise korral mõõdetuna toitevõrgust



Joonis 2.16. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse keskvaartused 0,445 sekundilise lühise korral





Joonis 2.17. Pinge ja voolu THD väärtused 0,445 sekundilise katkestuse korral.

## 2.5 Kokkuvõte

Kaks katset ühe autoga ei ole küll piisav tegemaks kaugeleulatuvaid järeldusi, aga hetkel võib kinnitada, et sõltumata katkestuse kestvusest (0,233 või 0,445 sekundit) on toitekatkestus mõlemal juhul ligikaudu 10 sekundit. Täpsemate hinnangute tegemiseks oleks tarvis läbiviidud katseid täiendada. Arvestades autode hinda ja autoomanike vähest huvi katsete läbiviimise osas, on paraku täiendavate katsete tegemine keeruline. Üheks võimaluseks elektriautosid katsetada on nende tavapärase laadimise pidev mõõtmine ootuses, et süsteemis leiab aset mõni häiring.

Võttes kokku esialgsed katsetulemused, võib öelda, et ülekandevõrgus toimuvad lühiajalised toitekatkestused ei kujuta elektriautodele ohutu ning laadimisprotsess jätkub pärast 10 sekundilist katkemist tavapäraselt. Seega ei avalda lühiajalised katkestused mõju tarbimismustrile ja elektriautot võib vaadata kui tarbijat, kes tarbib stabiilselt 2 kW võimsust 7-8 tunni jooksul.

Siiski peab arvestama olukorraga, kus tegemist on palju ühte tüüpi elektriautodega ning nende üheaegne laadimine võib tähendada lühise korral elektrivõrgule tarbijate sarnast käitumist. Hetkel tähendaks see maksimaalselt ligikaudu 1 MW (500 autot a' 2 kW laadimisvõimsus) muutumist lühise korral.

## 2.6 Kirjandus

- [1] M. Melder, „Üleriigilise elektrisõidukite kiirlaadimistaristu kirjeldus ja kiirlaadimise hinna arvutus,“ TTÜ elektroenergeetika instituut, 2012.
- [2] O. Veneri, L. Ferraro, C. Capasso, D. Iannuzzi, „Charging Infrastructures for EV: Overview of Technologies and Issues“, Itaalia, 2012.
- [3] T. Loewel, C. Lange, F. Noack, „Identification and positioning system for inductive charging systems“, Saksamaa, 2013.
- [4] Ford, N., presentatsioon „Plugging the Sustainability Gap: Boosting the European Electric Vehicle Market“, Brüssel 2013
- [5] Ü. Treufeldt, Lühised elektrisüsteemides, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2012.
- [6] H. Tammoja, Õppeaine „Automaatika ja releekaitse“ loenguslaidid, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2013.
- [7] Võrgueeskiri, Riigi Teataja RT I, 29.12.2012, 61, <https://www.riigiteataja.ee/akt/129122012061> [Online] 30.12.13
- [8] Taklaja, P., 110 kV õhuliinide isolatsiooni töökindluse analüüs ja töökindluse tõstmise meetodid, Tallinn : Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2012, 128 lk.

### **3. Elektriraudtee süsteemid**

Aruande järgnevas peatükis keskendutakse uurimustöö tulemustele elektriraudtee seisukohast. Käesolevas peatükis on toodud ülevaade maailmas laialt levinud AC 25 kV elektriraudtee süsteemidest ning peatükk 3.2 keskendub erinevatele kontaktvõrkude süsteemidele. Detailse ülevaate Hispaania, Jaapani, Itaalia, Hiina, Korea ja Soome riikide kontaktvõrkude tehnilistest lahendustest ja eripäradest annab peatükk 3.3. Edasi keskendutakse peatükis 3.4 kahe peamise AC 25 kV 50 Hz toitesüsteemi võrdlusele, kus tuuakse välja mõlema eelised ja puudused. Peatükid 3.5 ja 3.6 kajastavad nii raudtee veolajaamades kui ka kontaktliinidele paigaldatavaid trafosid, kirjeldades nende omadusi ja rakendamise eesmäärke kontaktvõrkudes.

#### **3.1 Üldist**

Rail Baltic projekti üldiseks eesmärgiks on taastada ühendus Balti riikide ja Euroopa raudteevõrgu vahel. Siiani on Balti riikide raudteesüsteem (standardne rööpmelaius 1520 mm) mandri-Euroopa standarditega (rööpmelaius 1435 mm) ühildamatu, mistõttu on Euroopa Komisjoni otsustatud (Euroopa Komisjoni otsus nr 884/2004 29. aprillist 2004), et Eesti, Läti ja Leedu riikide raudteetransport tuleb täielikult integreerida laiemasse Euroopa raudteetranspordisüsteemi. Rail Baltic on Euroopa Liidu üleeuroopalise transpordivõrgu (TEN-T) üks prioriteetsemaid projekte. Rail Balticu idee esitati esmakordselt 1994. aastal ühises poliitilises dokumendis „Visioon ja strateegiad Läänemere ümber, 2010” kui Läänemere regiooni ruumilise arengu oluline element [1]. Rail Baltic arendamiseks on muu hulgas antud suunised Eesti Vabariigi Valitsuskabineti 22.09.2011 otsusega, Eestis 10.11.2011 allkirjastatud Eesti, Läti ja Leedu peaministrite ühisdeklaratsiooniga ning samade riikide transpordi eest vastutavate ministrite 07.12.2011 allkirjastatud kokkuleppega [1].

Rail Balticu on läbi Läti ja Leedu Eesti pealinna Tallinnat ja Poola pealinna Varssavit ühendav raudteeprojekt, mille strateegiline uuring viidi läbi Euroopa Komisjoni regionaalpoliitika peadirektoraadi tellimisel 2005. aasta novembrist kuni 2006. aasta detsembrini [2]. Teostatavuse eeluuringu eesmärgiks oli strateegiliselt hinnata üldist vajadust ja potentsiaali Rail Balticu arendamiseks ja anda soovitusi projektis kõige sobilikuma arendusvõimaluse rakendamiseks trassi paiknemise, tehniliste standardite ja korralduse osas [2].

Hetkel kasutatakse Balti riikides põhja-lõuna suunal olemasolevat raudteedevõrku rahvusvaliseks reisijate- ja kaubaveoks vähe, kuna see on halva kvaliteediga ning madala kiiruse ja teeninduse tasemega [2]. Rail Balticu projekt püüab luua turvalise, kiire ja kvaliteetse ühenduse Balti riikide ja Lääne-euroopa suuremate majandus-, haldus- ja kultuurikeskuste vahel ning

tänu Poolas asuva keskuse kaudu ka teiste ELi riikidega [3]. Paranenud raudteeliinid tagavad tõhusama maismaaühenduse Balti riikide ja Põhjamaade (Soome) vahel ja ulatuvad pikemas perspektiivis ka kaugemale Kesk-Aasiasse. Paranenud ühendus toob kasu keskkonnale, leevendab ummikuid Euroopa maanteedel, parandab ligipääsu Balti riikides ning võib omada positiivset mõju projektis osalevate riikide regionaalarengusse [2].



*Joonis 3.1. Kavandatud Rail Balticu raudteetrass on üheks osaks Euroopa Liidu transpordinfrastruktuuri TEN-T võrgustikust [1]*

Lääne Euroopat ühendava raudteesüsteemi kasutusele võtmiseks ja selle ühtlustamiseks ei piisa ainult rööpmelaiuse muutmisest Balti riikides. Raudteeliini töövalmiduse saavutamiseks on tarvis rakendada täiendavaid meetmeid ühtse ja toimiva süsteemi saavutamiseks. Seoses Rail Balticu 1435 mm rööpmelaiusega raudteeliiniga kehtestatakse koostalitlusvõime direktiiv ja sellega seotud tehnilised koostalitlusnõuded (TSI) [1] kogu Rail Balticu süsteemis, nagu ka kõigis kolmes Balti riigis ning naaberpiirkondade Poolas ja Helsingis. Rail Balticu on planeeritud kõige kaasaegsema TSI alusel [3]. Koostalitlusvõime direktiiv ja sellega seotud tehnilised koostalitlusnõuded on kavandatud selleks, et hõlbustada kogu ELi raudteesüsteemi „tehnilise ühtlustamise optimaalset taset” eesmärgiga parandada selle konkurentsivõimet, näiteks alandades tootmis-, vastuvõtmis-, tegevus- ja hoolduskulusid. Ühest küljest on eesmärk toetada rahvusvahelisi raudteeteenuseid ja teisest küljest luua ühised ELi eeskirjad vastavushindamiseks ning infrastruktuuri, paiksete rajatiste ja sõidukite kasutuselevõtuks [3]. Peamised skeemiparameetrid on saadud uue TEN-T põhiraudteeliini põhjal, mis toimib kauba- ja reisijateveo raudteeliinina.

TSI võtmeparameetrid on [3]:

- raudteeliini kategooria IV-M,
- ehitusgabariit GC,
- maksimaalne teljekoormus 25 t,
- maksimaalne kiirus raudteeliinil 240 km/h (kiirus, mida kasutatakse raudteeliini ehitamiseks/geomeetriaks),
- maksimaalne rongipikkus 750 m.

Süsteemide ühtlustamisel esinevad mahukamad probleemid infrastruktuuri valdkonnast. Lisaks rööbaste parameetritele on olulisel kohal ka nende geomeetria ja kvaliteet ning vastupidavus, aga ka ooteplatvormid peavad vastama ühesugustele tingimustele kogu liini ulatuses. Energia- varustuse seisukohalt on oluline tagada piisav energiavarustus. Selleks peab olemasolev elektrivõrk tagama piisava koguvõimuse. Määratleda tuleb raudteeliini toitealajaamade asukohad ja ühendused. Ka vooluvõtu kvaliteet peab olema piisav, selleks on oluline saavutada hea ühendus pantograafi ja kontaktõhuliini vahel. Omavahel peavad ühilduma kogu liini ulatuses ka juhtkäsud ja signaalimine, seda nii rongil asuvatel- kui ka raudteeäärsetel süsteemidel. Raudteeliiklusega kaasneb ka teatav müra, mille hindamine ja piirangute seadmine on olulisel kohal. Kaubaveo ja teeninduse seisukohalt on tarvis ühtlustada teabesüsteemid ja järelevalve, sorteerimis- ja jaotussüsteemid ning tagada toimiv sidevahetus teiste veoliikidega. Liini ohutuse, töökindluse, kasutatavuse ja tehnilise ühilduvuse seisukohalt on oluline tagada liikluse korraldamine ja raudtee kasutamine, selleks on tarvis vastavat personali ja asutust. Rail Balticuga seotud koostalitlusvõime direktiivid ja nende võimalikud mõjud on täpsemalt toodud aruandes [3].

Uuringutes [2] ja [3] on teostatud põhjalik analüüs Rail Balticu arendus- ja teostatavusvõimalustele. Hinnati kolme erinevat infrastruktuuri rakendamise stsenaariumit [3]:

- iseseisev 1435 mm rööpmelaiusega raudteeliin (uued raudteeliinid),
- 1435 mm rööpmelaiusega raudteeliin, mis külgneb olemasoleva 1520 mm,
- rööpmelaiusega raudteeliiniga (olemasolevad raudteeliinid),
- 1435/1520 mm dubleeritud rööpmelaiusega raudteeliin.

Tehnilised piirangud toodi välja raudteeinfrastruktuuri, signalisatsiooni ja telekommunikatsiooni, elektri, hooldusvõime ja veeremi suhtes. Iga kaalutud valik hõlmas mitmeid infrastruktuuride stsenaariumide kombinatsioone. Leiti, et dubleeritud rööpmelaiuse stsenaariumit tuleb pidada kõige halvemaks variandiks, kuna selline lahendus on seotud kõige suuremate tehniliste

piirangutega ja seda rakendatakse vaid linnapiirkondades, kus ei ole mõistlik kasutada muid variante [3].

Analüüsitud on mitmeid erinevaid trassivalikuid ning eelistatumaks osutus Tallinn – Pärnu – Riia – Panevezys – Kaunas – Varssavi (Joonis 3.2). Kurvide ning kiiruspiirangute vähendamiseks õgvendatud uus 1435 mm rööpmelaiusega raudteeliin algab Leedu piirilt ning suundub Kaunasesse. Raudteeliin ei läbi Kaunase terminali otse, vaid kasutab Palemonase raudteejaama olemasoleva 1520 mm rööpmelaiusega raudteeliini transiidipunktina, et ühendada terminal ning bussi- või 1520 mm rööpmelaiuse raudteeliiniga lennujaama teenindava transpordi peatus. Ka uus kavandatud ühendvedude rajatis asub selles piirkonnas ning seda on võimalik lihtsalt kõnealuse raudteeliini kaudu teenindada. Liin suundub põhja poole läbi Panevėžyse lääneosa, kus on kauba- ja reisijateveo peatus, ning läheb edasi põhja poole Lätisse. Lätis jätkub trass Iecava juures ning suundub üle Daugava jõe Riiast idas Salaspilsi, kuhu on kavandatud ida-lääne ühendvedude transiitjaam. Riia linna teenindab uus 1435 mm rööpmelaiusega raudteeliin, mis kasutab terminali suunduvat vana Ergli trassi. Terminalist saabuvad rongid kasutavad sama raudteeliini, et jõuda tagasi põhja-lõuna suunalisesse põhilõiku. Sellest transiidipunktist jätkub raudteeliin põhja suunas paralleelselt Pärnusse suunduva Via Balticu maanteetrassiga, seejärel tuleb veel üks vahepeatus ning raudteeliin lõpeb Tallinnas Balti jaamas, peatudes esmalt Tallinna Lennujaamas. Tallinna lähedusesse ehitatakse haruliinid, mis viivad nii Muuga Sadamasse kui ka Helsingi suunale kavandatud transiidipunkti [3].



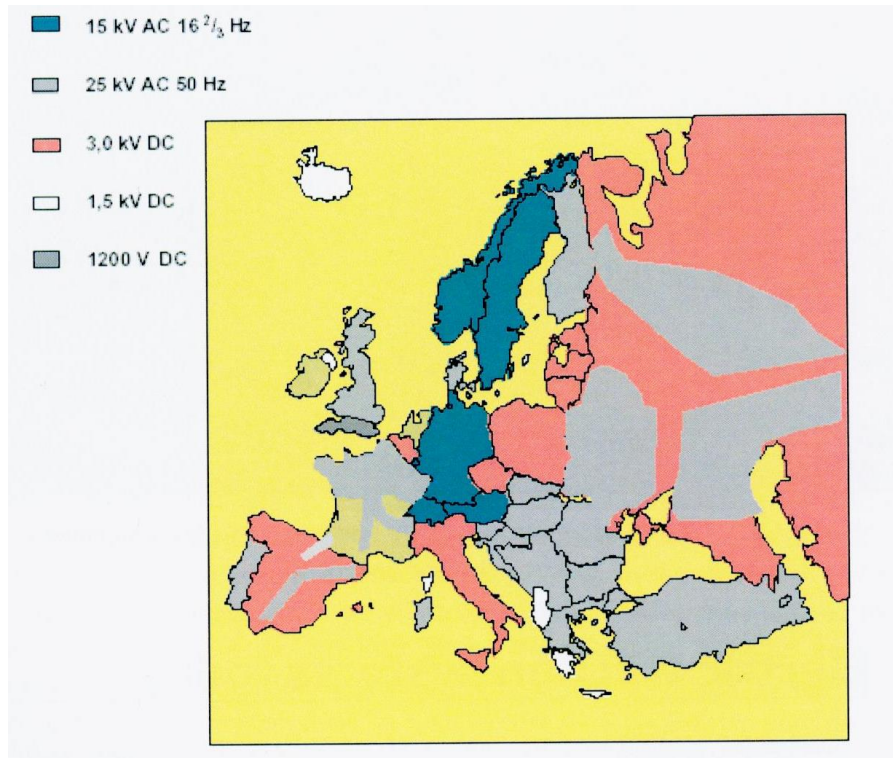
Joonis 3.2. Raudteeliin Tallinn – Pärnu – Riia – Panevezys – Kaunas – Varssavi [3]

Raudteeliini põhinäitajad on järgmised [3]:

- uue raudteeliini kogupikkus on 728 km,  
Eesti = 229 km  
Läti = 235 km  
Leedu = 264 km
- kavandatud maksimumkiirus 240 km/h,
- raudteeliin on ühendveoga harilik raudteeliin,
- sõiduaeg Tallinnast Leedu/Poola piirini,  
reisijad 4,13 tundi (4 h 8 min)  
kaubad 10,38 tundi (10 h 29 min) (aeg muutub olenevalt peatuste arvust)
- keskmine kiirus;  
reisijatevedu 170 km/h  
kaubavedu 68 km/h
- reisijateveo teenust osutatakse iga kahe tunni järel alates kella 6-st hommikul ja lõpetades umbes südaööl,
- uued/ajakohastatud reisijate peatused Palemonases (teenindab nii Kaunase keskust ja lennujaama koos olemasoleva 1520 mm rööpmelaiusega raudteeliiniga), Panevėžyses, Riia terminalis, Pärnus, Tallinna Lennujaamas ja Tallinnas Balti jaamas,
- ühendvedude põhiterminalid Tallinnas, Riias ja Kaunases ning ühendvedude teised terminalid Panevėžyses ja Pärnus,
- hooldusrajatised Raplas, Riias ja Jonavas,
- raudteeliin on põhiliselt uue trassi kogupikkuse ulatuses kaherealine,
- mõned kahesuguse rööpmelaiusega (1520/1435) lõigud on vajalikud.

Praegu on maailmas ja ka Euroopa siseselt elektriraudteedel kasutusel palju erinevaid süsteeme. Kuidas olemasolevate lahendusteni on jõutud on kirjas pikemalt projekti esimese aasta aruan- des. Kokkuvõtvalt võib öelda, et täna on Euroopas kasutusel mitmeid erinevaid nii vahelduv- kui ka alalisvoolu nimipingetel töötavaid süsteeme. Joonisel 3.3 on toodud Euroopa elektri- raudtee kontaktvõrkude toitesüsteemide kaart. Antud jooniselt on näha, et näiteks Rootsis, Nor- ras, Saksamaal, Šveitsis ja Austrias on kasutusel 15 kV AC  $16^{2/3}$  Hz süsteem. Suurem osa Hispaaniast, Itaalia, Tšehhi, Poola, Balti riigid ja osaliselt ka Venemaa kasutab 3 kV alalisvoolu

süsteemi. Mõnel pool on veel töös vanemad pingesüsteemid nagu 1,5 ja 1,2 kV AC. Suur osa Euroopast rakendab elektriraudteedel aga 25 kV AC 50 HZ süsteemi, seda nii põhisüsteemina kui ka üksikutel elektrifitseeritud lõikudel.



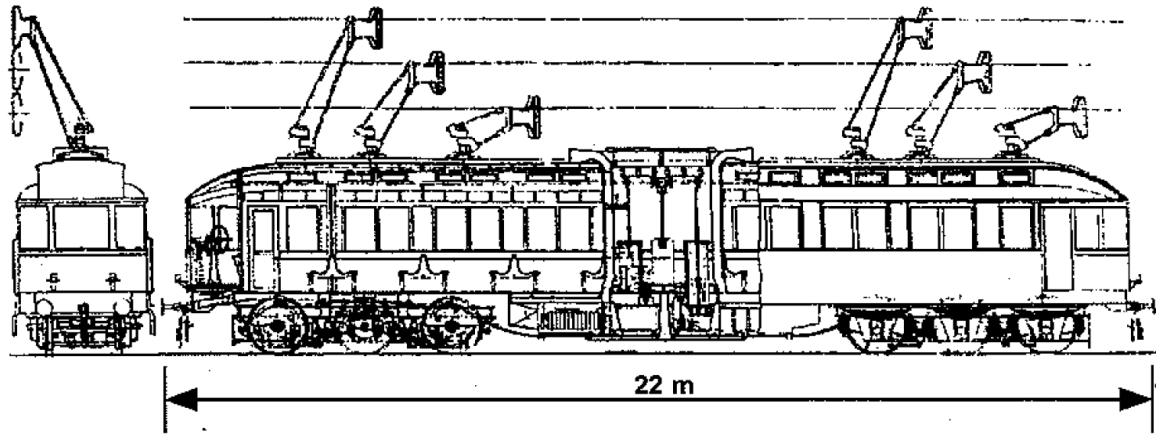
Joonis 3.3. Elektriraudtee kontaktvõrkude nimipinged Euroopas [4]

Vahelduvvoolusüsteemide eeliseks alalisvoolusüsteemide ees on, et samaväärset võimsust saab üle kanda kõrgematel pingetel kasutades selleks väiksemate ristlõigetega juhte. DC süsteemide puhul rakendatakse lisa relsiga süsteemi, et vältida suurte läbimõõtudega juhtmeid kontaktvõrguliinidel. Lisaks vajab DC süsteem rohkem veolajaamu (kuni 8 korda) võrreldes AC süsteemiga [5]. Reeglina rakendatakse vahelduvvoolu kiirraudteedel ning pikematel liinidel, alalisvoolu aga linnalähistel liinidel ja metroodes. Viimasel juhul on vedurid oma tehnoloogialt lihtsamad ja vedurid ehituselt kergemad, seega on alalisvoolusüsteemide ohutusest tulenevalt võimalik rakendada väiksemaid ohutusvahemikke.

Esimestel elektrifitseeritud raudteeliinidel kasutati alalisvoolupinget. Esimesed ühiskondlikud elektriraudteed, metroo- ja trammiliinid, arenesid välja suurtes linnades, kuna tekkis kasvav vajadus reisijateveoks. 1881. aastal ehitati Berliini esimene trammiliin, millel elektrienergiat vahendati rongile kolmanda rööpaga. 1885. aastal Torontos leidis esimest korda rakendust rongi toitmine õhuliinilt. Esimene metroo Londonis avati 1890. aastal. Juba 1890-ndatel sai selgeks, et AC toitega võrgul on eeliseid DC võrgu ees, kuna esimene võimaldab edastada suuremat



energiat pikemate vahemaade taha. Esimene 3-faasiline vahelduvvoolul põhinev elektriraudtee ehitati 1899. aastal Šveitsis, kus oli kasutusel 3 kV 15 Hz toitesüsteem. Raudtee arenemisega tekkis vajadus elektrirongide kiiruse tõstmiseks. 1903. aastal Saksamaal saavutati rongi kiiruseks 213 km/h, antud 3-faasilise elektrivarustusega raudteevagun on toodud joonisel 3.4.



*Joonis 3.4. 3-faasilise raudteevagun, mis saavutas 1903. aastal Saksamaal kiiruse 213 km/h [4]*

Edasine areng näitas, et 3-faasilisel vahelduvvooluga kontaktvõrgul esineb rida puudusi, kuna kontaktõhuliinid on keerukad ning lisaks tekkisid probleemid mootori kiiruse juhtimisel. Sellest tulenevalt otsustati kasutusele võtta 1-faasiline vahelduvvooluga toitesüsteem, mis tehniliselt vajab ainult ühte õhuliini juhet. Sellisel juhult tekkisid aga probleemid piisava võimsusega mootori ehitamisel. 1905. aastaks suudeti Šveitsis ehitada ja kasutusele võtta esimene 1-faasilisel vahelduvvoolutoitel olev elektriraudteeliin. 1900-ndatel leidis erinevates riikides rakendust mitmete nimipingete ja võrgusagedustega 1-faasilisi AC elektriraudtee süsteeme. Näiteks 6,3 kV 25 Hz (Berliin), 10 kV 15 Hz (Preisimaa), 12 kV  $16\frac{2}{3}$  Hz (Prantsusmaa). Esimese maailmasõja ajal leidis Kesk-Euroopas ja Skandinaavias kasutust 15 kV  $16\frac{2}{3}$  Hz toitesüsteem varem edukateks osutunud katsete tõttu Šveitsis ja Rootsis. 1920-ndatel esitleti esimest 16 kV 50 Hz toitesüsteemi Ungaris ning 1933-1960 katsetati Saksamaal 20 kV 50 Hz toitesüsteemi erinevate veojõumasinatega: elavhõbedaalalditega vedurid, DC mootorid ja kommutaatormootorid. 1951. aastal Prantsusmaal ehitatud 20 kV 50 Hz raudteesüsteemi positiivne tulemus andis tõuke edaspidise laialt rakendust leidnud 25 kV 50 Hz raudteetoitesüsteemile, mis valiti 1958. aastal Suurbritannias standardseks elektriraudtee toitesüsteemiks.

### 3.2 Kontaktvõrkude süsteemid

Elektriraudteedel on maailmas kasutusel mitmeid erinevaid toitesüsteeme ja kontaktvõrgu lahendusi. Kontaktvõrgu eesmärgiks on tagada elektrienergia ülekanne elektrirongidele ning kasutatavaid lahendusi defineeritakse vastavalt veoalajaamadesse paigaldatud trafode kaudu. Veoalajaamade funktsiooniks on konverteerida võrgust edastatav toitepinge veojõusüsteemile sobiva pinge ja sagedusega nimiparameetritele, et see edastada läbi kontaktliinide tarbijale ehk rongile. Raudteede elektrifitseerimisel on saanud põhi- ja linnalähedastel liinidel üle maailma standardseks vahelduvvoolu nimipinge 25 kV sagedusel 50 Hz. Näiteid antud süsteemi rakendamisest saab tuua peaaegu kõikjalt Euroopast: Suurbritannia, Prantsusmaa, Soome, Saksamaa, Luksemburg, Portugal, Hispaania, Holland, Belgia [6], [7]. 23,8% ulatuses Euroopa elektriraudteede kogupikkusest kasutatakse toitesüsteemina just AC 25 kV 50 Hz [7]. Lisaks Euroopale saab näiteid tuua aga ka mujalt maailmast: Venemaa, Rumeenia, India ja Hiina [7], [8]. Üldistatult saab vahelduvvoolu kontaktvõrgu süsteemidest eristada kolme põhirühma:

- 1x25 kV süsteem (otsetoitega süsteem)
- 2x25 kV süsteem (autotrafodega süsteem)
- 3/2x25 kV süsteem (eritüüpi trafoühendusega süsteem)

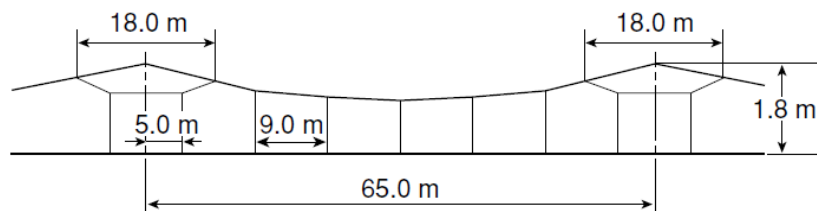
Elektrirongid on ühefaasilised tarbijad ning neile vajamineva elektrienergia konverteerimiseks 3-faasilisest ülekandevõrgust on mitmeid mooduseid. Üheks võimalikuks lahendiks on 1-faasiline nn otsetoide, kus veoalajaama on paigaldatud ühefaasiline trafo (1x25 kV). Antud süsteem leiab laialdast kasutust üle maailma, näiteid võib tuua nii Hispaaniast [7], Soomest, Venemaalt aga ka Indiast [9]. Teise lahendusena kasutatakse veoalajaamades autotrafosid (AT), mille abil saadakse alajaamas sekundaarpinge väärtuseks 50 kV ning mis omakorda jaotatakse kontaktliini juhi ja tagasivoolu fiidri vahel (2x25 kV). Suure jõudlusega kiirraudteedele elektritoite tagamiseks eelistatakse maailmas just 2x25 kV kontaktvõrgu toiteskeemi. Antud süsteemi rakendatakse nii Prantsusmaal, Venemaal, Jaapanis [7], [8], [10] aga ka Itaalias [11], [12], [13], [14] ja Ameerika Ühendriikides (60 Hz) [15]. Erinevates riikides kasutusel olevaid veojõutoitesüsteeme ja kontaktliini konfiguratsioone vaadeldakse lähemalt järgmises peatükis. Lisaks juba mainitule paigaldatakse veoalajaamadesse ka eritüüpi trafoühendusi, mida võib nimetada 3/2x25 kV süsteemiks, kus 3-faasiline toitepinge konverteeritakse kahte 1-faasilisse vooluringi. Rakendatavaid trafoühendusi on mitmeid ja nii mõnedki on omavahel väga sarnased, rohkem analüüsitud ja kasutusel olevad on *Scott*- ja *V*-ühendusega trafod. Sobiva veojõusüsteemi vali-

mine on tehnilis-majanduslik küsimus, mille puhul tuleks lähtuda võimsusedastuse efektiivsusest ehk maksimaalse võimaliku väljundvõimsuse rakendamisest, pinge kvaliteedist ja häiringerade summutamisest [16].

### 3.3 Kontaktvõrkude lahendused maailmas

#### 3.3.1 Hispaania 1x25 kV 50 Hz

Madridi ja Seville vaheline 470 km pikkune elektriraudtee on elektrifitseeritud alates 2002. aastast täielikult 1-faasilise AC 25 kV 50 Hz elektrienergiaga. Antud liini maksimaalne kiirus on 300 km/h. Liinide veojõutoide edastatakse 12 AC 25 kV 50 Hz alajaama kaudu, mida varustatakse 220 või 132 kV 3-faasilisest Hispaania elektrivõrgust. Nõutav veojõud ühele veokusele on 8,8 MW (kokku on kaks üksust) toitesektsiooni kohta. Veojõualajaamad paiknevad teineteisest enamasti alla 50 km intervalli tagant. Kogu raudteeliinile toite tagamiseks on alajaamade summaarseks vajalikuks võimsuseks 500 MVA (arvestades ka abitoiteallikaid). Veoalajaamad on ühendatud primaarpoolel 3-faasilisse ülekandevõrku kasutades perioodiliselt muudetavat faasijärjestust. Kõik veoalajaamad on sarnase ehituse ja skeemiga, kus iga jõutrafo nimivõimsuseks on 20 MVA ja abitoitetrafodel 100 kVA [6]. Madridi – Seville kontaktõhuliinidel on kandeliini juhtmemark Bz 70 ja kontaktjuhtmeks on Cu AC-120. Õhuliinisüsteemi konstruktsioontüübiks on Re250 (Joonis 3.5). Antud konstruktsioontüüp on oma olemuselt lihtne, kus liini visangu pikkuseks on 65 meetrit ning kande- ja kontaktjuht on omavahel iga üheksa meetri tagant riputite abil ühendatud. Kontaktliini tagasivoolujuhid kulgevad paralleelselt raudteega õhuliinimastidel ning kasutusel on juhtmemark Al 240. Veoalajaamade vahelise toitevahemiku loomiseks kasutatakse neutraaltühimikke ning faasi sektsioonide eralduskohad on loodud kahe alajaama keskele [7].



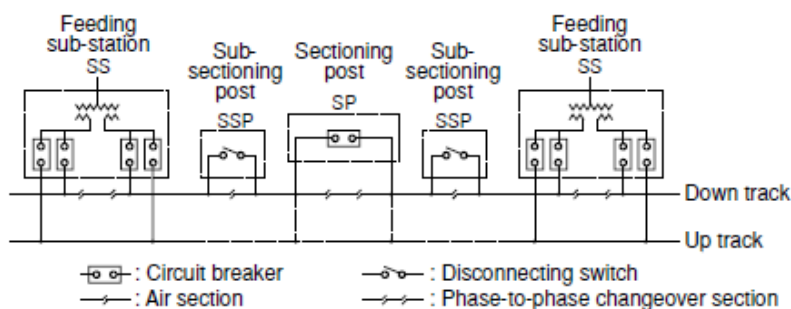
Joonis 3.5. Kontaktliini konstruktsioontüüp Re250 [8]

### 3.3.2 Jaapan 2x25 kV 50 Hz

Jaapani valitsuse poolt läbi viidud uuringu tulemused näitavad, et isiklikest reisidest 30% võetakse ette just rongiga, millest 90% juhtudest on tegemist elektrirongiga. Seda näitajat ületab ainult 54% autode kasutamine reisimisel, kusjuures busse kasutatakse antud uuringu põhjal reisimiseks ainult 7% juhtudest. Nende andmete põhjal võib järeldada, et raudtee elektrifitseerimine ja vastav tehnoloogia on Jaapani transpordisektoris olulisel kohal ning seda juba alates 20. sajandi algusest, mil elektriraudteest sai peamine transpordiviis Jaapanis. Jaapani raudteeliinid on tiheda liiklusgraafikuga ja omavad mitmeid varieeruvaid süsteeme. Kasutusel on nii AC kui DC süsteemid, võrgusagedused 50 ja 60 Hz, erinevad pingestmed (25, 20 ja 1,5 kV) ning ka erinevad rööpmelaiused (1435 ja 1067 mm) [17].

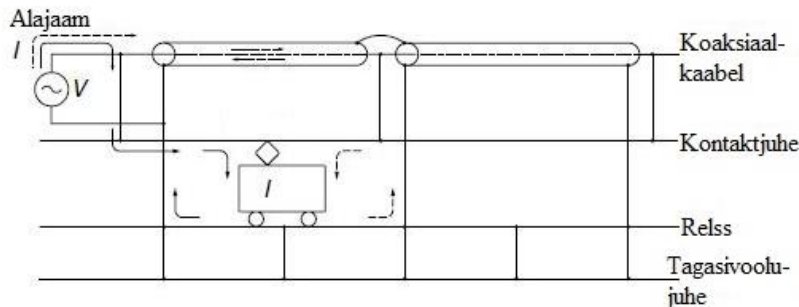
Jaapanis kasutatakse veolajaamades peamiselt kahte trafode ühendusmeetodit, nendeks on Scott- ja Woodbridge-ühendused [8]. Uutes alajaamades planeeritakse kasutusele võtta uut tüüpi trafolahendus, *roof-delta* [9]. *Scott-trafot* kasutatakse väiksema kui 170 kV võrgu nimipingega juures [6]. Tulenevalt elektromagnethäirete piiramise vajadusest on tänapäeva Jaapanis elektrifitseeritud raudteeliinidel saanud standardseks kontaktvõrku autotrafode lisamine.

AT süsteemi korral on veolajaamade vahemaa 20-60 km (ja 90-110 km kitsarööpmelistel 20 kV toidega liinidel). Veolajaamast edastatav toitepinge on kaks korda suurem kontaktliini pingest, kuid liinil iga 10 km tagant paiknevas AT-s jagatakse pinge vajalikule väärtusele (25 kV) [7]. Elektriraudtee kontaktvõrgu süsteem koosneb veolajaamadest ja toidet sektoriseerivatest mastidest (Joonis 3.6). Lisapingetrafodega süsteemi korral ühendatakse lisapingetrafod (BT) iga 4 km tagant kontaktjuhiga, et suunata tagastuvat voolu voolama tagasivooluahelas.



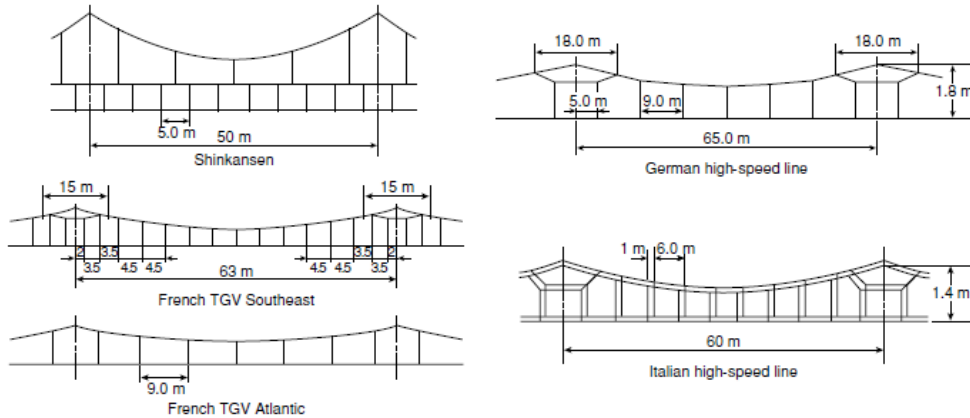
Joonis 3.6. Jaapani AC struktuurskeem [8]

Jaapanis kasutatakse ka koaksiaalkaabliga toitesüsteemi (Joonis 3.7), kus kaabel kulgeb paralleelselt rööbastega. Iga teatava kilomeetri tagant on sisemine kaablijuht ühendatud kontaktjuhtmega ja äärejuht raudtee rööbastega. See on paraku spetsiaalse kaabli tõttu kulukas lahendus, kuid see-eest on paigaldus lihtne ja vähe ruumi nõudev. Jaapan on ainuke riik, kus antud lahendus on rakendust leidnud [8]. Võrreldes õhuliinidega on kaablil väga väike edasi-tagasi takistus. Koormusvoolu kaablis võimendatakse selle ühenduspunktides õhuliiniga. Selline süsteem vähendab sarnaselt AT süsteemile teistes liinides esinevaid häiringuid.



Joonis 3.7. Koaksiaalkaabliga toitesüsteem [8]

Jaapanis kasutusel oleva kontaktõhuliini konstruktsiooni tüüp on toodud joonisel 3.8 (Shinkansen) koos võrdlusega Prantsusmaal, Saksamaal ja Itaaliaal rakendatava tüübiga. Kontaktjuhtme ja abijuhtmete andmed on esitatud tabelis 3.1. Kontaktõhuliin koosneb oma konstruktsioonilt kontaktjuhtmest, kandetrossist ja riputitest. Tavapäraselt on kontaktjuht valmistatud tugevdatud vasest ja kandetross galvaniseeritud keerutatud terasest. Liinilõikudes, kus on vajalik suurem võimsuse edastus kasutatakse ka tugevdatud keerutatud vaske [8]. Tabel 3.1 andmete põhjal on näha, et kontaktjuhtmeks kasutatakse nii Jaapanis, Prantsusmaal, Saksamaal kui ka Itaalias vaskjuhet, mille ristlõiked jäävad vahemikku 120 kuni 170 mm<sup>2</sup>, viimane on kasutusel just Jaapanis. Erinevalt kontaktjuhist varieeruvad kandejuhtme margid ja ristlõiked riigiti enamalt. Kui Euroopas on enamasti kasutusel lihtne kontaktliini konstruktsioon, siis Jaapanis kasutatakse tihedat ühendkonstruktsiooni (Joonis 3.8). Viimane omab lisaks kandejuhtmele ka abikandejuhet, mis on riputite abiga ühendatud kontaktjuhi ja põhikandejuhtme vahele ning aitab seeläbi vähendada juhtme venimist [7].



Joonis 3.8. Kasutusel olevad konstruktsioonid kontaktliinidel [8]

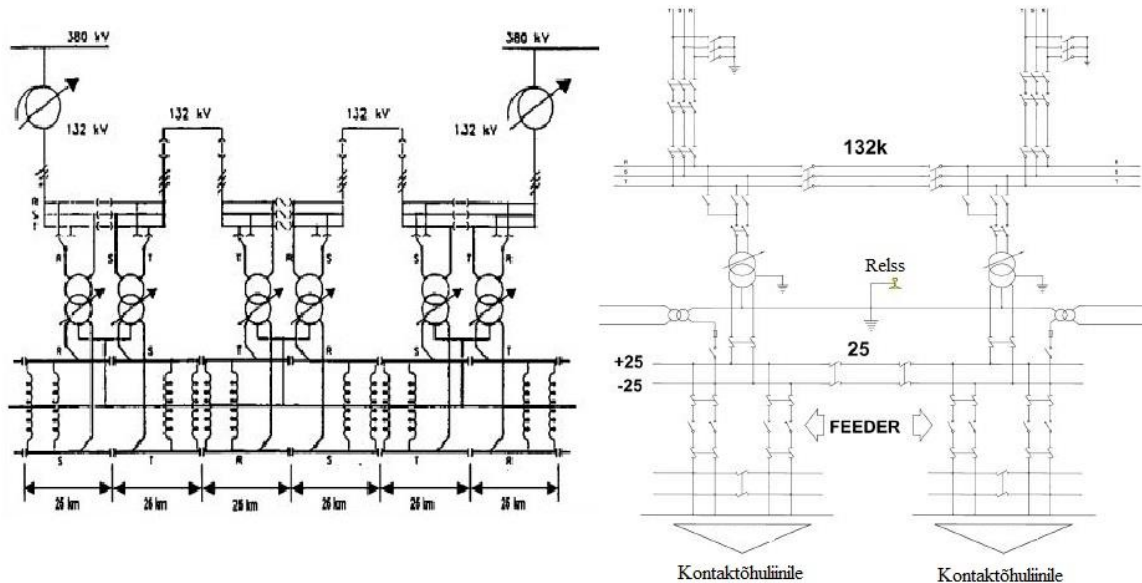
Tabel 3.1. Juhtmete andmed [8]

Item	Japan	France		Germany	Italy	
		TGV Southeast	TGV Atlantic			
Catenary type	Heavy compound type	Stitched and simple	Simple	Stitched and simple	Twin stitched and simple	
Standard span [m]	50	63 (Stitched wire 15)	63	65 (Stitched wire 18)	60 (Stitched wire 14)	
Standard wire height [m]	5.0	4.95	4.95	5.3	4.85	
System height [mm]	1,500	1,400	1,400	1,800	1,400	
Wire grade	Suspended	St 180 mm <sup>2</sup> (1.450 kg/m)	Bz 65 mm <sup>2</sup> (0.59 kg/m)	Bz 11 70 mm <sup>2</sup> (0.63 kg/m)	CdCu 153.7 mm <sup>2</sup> (1.42 kg/m)	
	Auxiliary suspended	Cu 150 mm <sup>2</sup> (1.375 kg/m)	Bz 35 mm <sup>2</sup>	—	Bz 11 35 mm <sup>2</sup> (0.31 kg/m)	
	Contact wire	Cu 170 mm <sup>2</sup> (1.511 kg/m)	CdCu 120 mm <sup>2</sup>	Cu 150 mm <sup>2</sup> (1.33 kg/m)	CuAg Ri 120 mm <sup>2</sup> (1.08 kg/m)	CuAg 151.7 mm <sup>2</sup> (1.35 kg/m)
Contact line total density [kg/m]	4.34	1.65	1.92	1.71	2.77 × 2	
Catenary wire tension	Suspended [N]	24,500	14,000	14,000	15,000	18,400
	Auxiliary suspended [N]	14,700	4,000 (Stitched wire)	—	2,800 (Stitched wire)	2,900 (Stitched wire)
	Contact wire [N]	14,700	14,000	20,000	15,000	14,700
	(Total tension) [N]	(53,900)	(28,000)	(34,000)	(30,000)	(33,100 × 2)
Wave propagation velocity of contact wire [km/h]	355	414	441	424	376	
$\beta$ (train speed/ wave propagation velocity)	0.68, 0.76 (= 240, 270/355)	0.65 (= 270/414)	0.68 (= 300/441)	0.59 (=250/424)	0.66 (= 250/376)	
Pre-sag	None	1/1,000	1/1,000	1/1,000	1/1,000	

### 3.3.3 Itaalia 2x25 kV 50 Hz

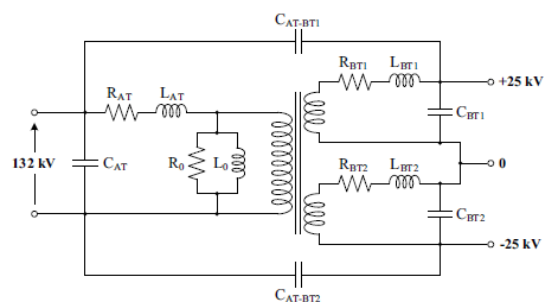
Itaalias rakendatakse suure võimsuse ja kiirusega raudteedel 2x25 kV 50 Hz toitesüsteemi. Primaarpoole toitepingeks on 3-faasiline 132 kV (Põhja-Itaalia) või 150 kV (Lõuna-Itaalia) [11]. Ühendusskeem ülekandevõrguga on toodud Joonis 3.9 kusjuures transportliine toidetakse ülekandevõrgust läbi autotrafode.

Selline süsteem tagab varustatuse kõigile alajaamadele ka Rahvusvahelise Veovõrgu (NTG) või 132 kV võrgu primaarpoole rikke korral (NTG võrgu edastavad võimsust on kuni 200 MW) [12]. Veojõuenergia edastussüsteem koosneb 132/55 kV veoalajaamadest, 55/27,5 kV autotrafodest (AT-punktid, mis on paralleelses ühenduses toitealajaamadega) ja kontaktliinidest [10].



Joonis 3.9. Kontaktvõrgu ühendusskeem ülekandevõrguga ja alajaama skeem [12]

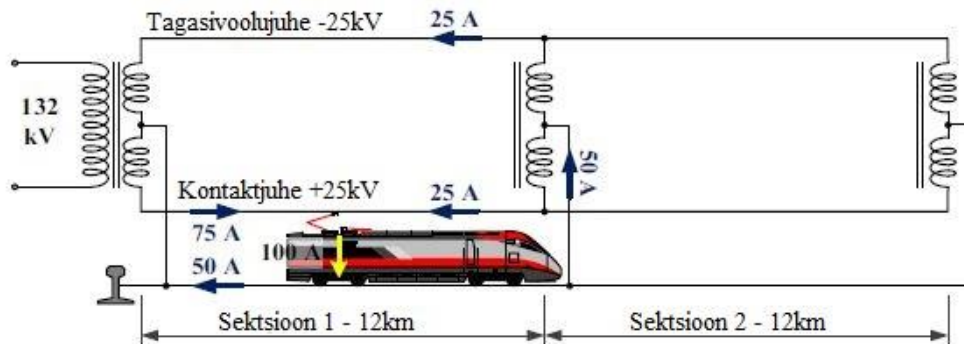
Raudteeliini iga 50-60 km [12] peal olevasse veoalajaama on paigaldatud AT, mille sekundarmähise keskväljavõtte on ühendatud rööpaga. Veoalajaam toidab kahte kontaktliini ja kahte abitoiteliini pingega  $\pm 25$  kV [11]. Itaalia kontaktvõrgu veoalajaamades kasutusel olevate trafode nimivõimsus on 60 MVA [14]. Alajaama paigaldatakse kaks trafot koguvõimsusega 120 MVA (üks trafo on reservis; alajaama kogu installeeritud võimsuse suhteks liinide pikkusesse arvestatakse 1-2 MW/km) [12]. Joonis 3.9 kajastab veoalajaama skeemi ja joonis 3.10 veotrafo skeemi.



Joonis 3.10. Veotrafo elektriskeem (lisatud on mahtuvus, arvestamaks trafo sisemiste mahtuvuslike mõjudega) [10]

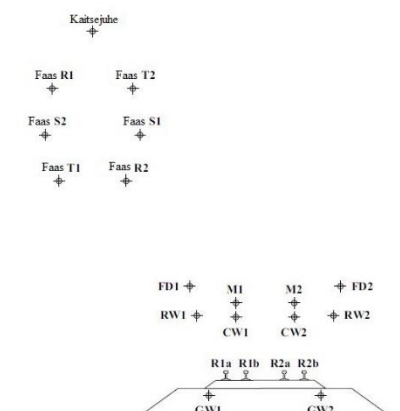
55/25 kV ATd on ühendatud raudteeliinile, sarnaselt veoalajaama trafoga, iga 12 km tagant AT-punktis (Joonis 3.11). Selle tulemusena luuakse paralleelühendus iga abitoite-, kontakt- ja kan-dejuhtme paari vahel. Iga veoalajaam toidab 24 km pikkust raudteeliini sektsiooni, kus igas sektsioonis on kaks AT-punkti lahtrit [10]. ATd on sarnaselt veotrafodele valmistatud suhtarvuga 1:1, kuid tänu mähiste vahelisele ühendusele saavutatakse poole väiksem sekundaarpinge

väärtus. ATde nimivõimsuseks on 15 MVA [13]. 2x25 kV toitesüsteemi tööpõhimõtte kontaktliinis on esitatud joonisel 3.11.



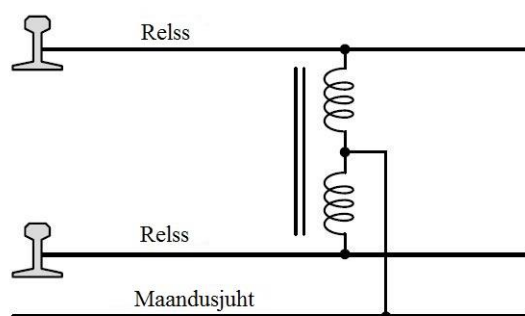
Joonis 3.11. Itaalia kontaktvõrgu konfiguratsioon [11]

Kontaktliinid sisaldavad oma konfiguratsioonilt mitmeid juhte, mis on raudteeliini ulatuses elektrilises ühenduses: kontakt- ja kandejuhe, relsid ja maandusjuhe ning abitoitejuhe ja tagasivoolujuhe (ehk fiidrijuhe). Joonistel 3.12 ja 3.13 on toodud juhtide geomeetriline paiknemine raudteeliinil. Kogu raudteeliini pikkuses iga 750 meetri tagant on maandusjuhid omavahel ühendatud. Relsid ja maandusjuht on läbi induktiivse sideme (Joonis 3.14) ühenduses 1500 meetri tagant, et vähendada sammu- ja puutepinget ning maandada relsid. Tagasivoolu- ja maandusjuhe on ühendatud igas õhuliinimastis ca 60 meetri tagant. Ka maandus- ja kandejuhe on omavahel ühendatud igas kontaktliini rippes. Lisaks juba nimetatud ühendustele on lisatud rööppaaridele ka täiendavaid seadmeid, näiteks S-ühendus iga 1600 meetri tagant ja mahtuvuslik kompensaator iga 100 m tagant. S-ühenduse (Joonis 3.15) puhul on tegemist paari meetri pikkuse kaabliühendusega relsside vahel, mis on vajalik eraldamiseks omavahel rööpa signaali-vooluringi järgnevast rööpa vooluringist [11]

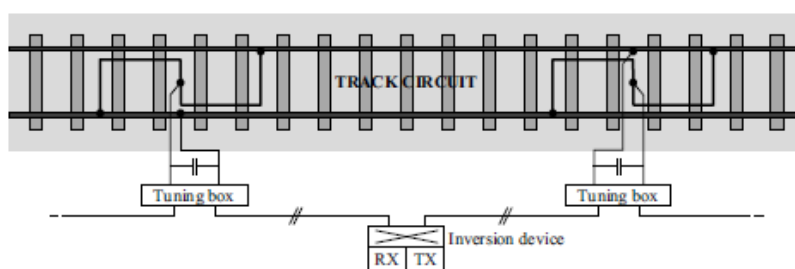


Joonis 3.12. Juhtide geomeetriline paiknemine: FD – abitoitejuhe; RW – tagasivoolujuhe; M – kandejuhe; CW – kontaktjuhe; R – relss; GW – maandusjuhe [11]





Joonis 3.14. Relsi ja maandusjuhi ühendusskeem [11]



Joonis 3.15. S-ühenduse skeem [10]

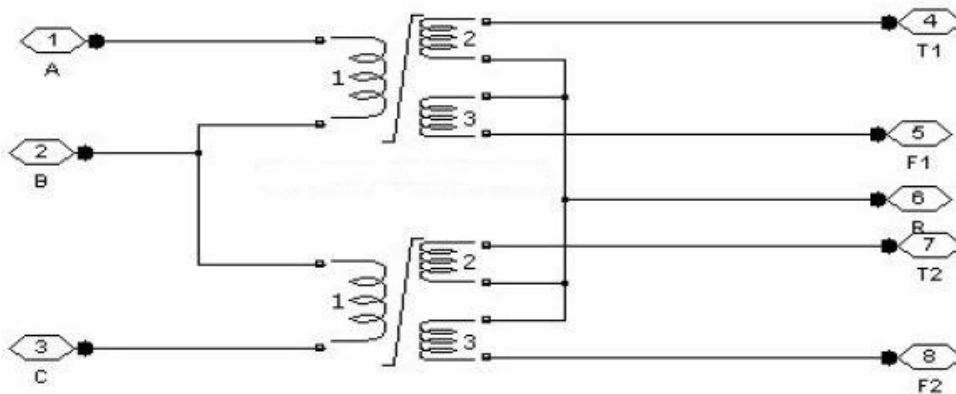
Itaalias on kontaktliinisüsteemis nii kontaktjuhe ristlõikega  $120 \text{ mm}^2$  kui ka kandejuhe ristlõikega  $150 \text{ mm}^2$  valmistatud vasest. Abitoitejuht on valmistatud terasalumiiniumist ristlõikega  $307 \text{ mm}^2$ . Maandusjuhina on kasutusel  $95 \text{ mm}^2$  ristlõikega nii vask- kui ka alumiiniumjuhe [12].

### 3.3.4 Hiina 3/2 + 2x25 kV 50 Hz

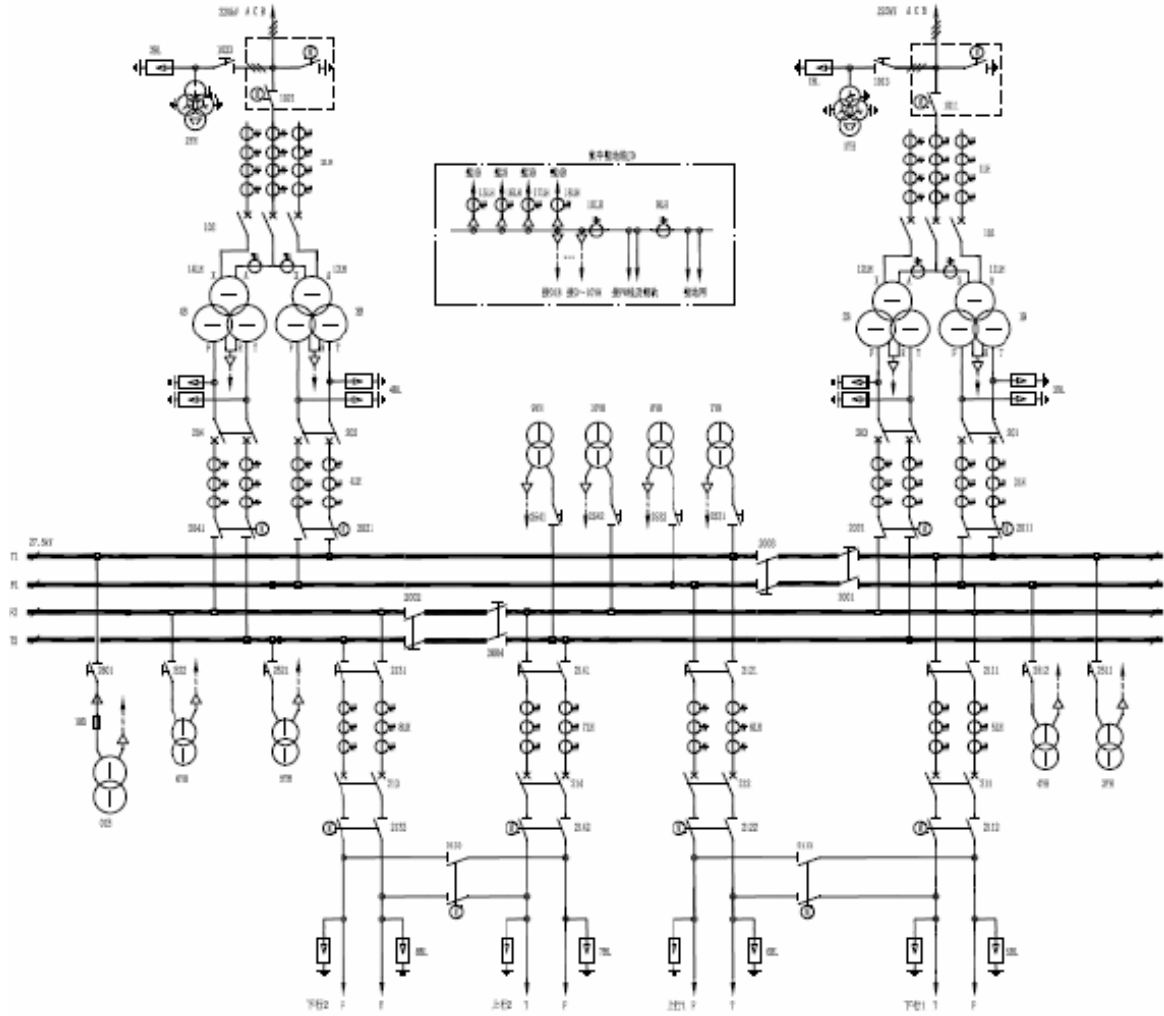
Suurem osa Hiina kiirraudteedest kasutab AT süsteemi, kuna sellel on palju eeliseid. Näiteks suur edastusvõimsus, kõrgem pinge väärtus, väike kontaktliini takistus. Ühtlasi on antud süsteemil ka väiksem mõju lähedal paiknevatele sideliinidele ning suurimaks plussiks on võimalus rakendada veoalajaamade vahel pikemaid vahemaid [18].

Veoalajaamades on kaks sisenevat liini ja enamasti kaks trafot. Kasutatakse, kas 1-faasilist otsetoidet või trafode V-ühendust. Pikki raudteeliini paigaldatakse iga 10-15 km tagant süsteemi AT [18]. Tüüpiline Hiina veosüsteem saab oma toite 220 kV (või 330 kV [19]) võrgust õhuliini kaudu. Enamasti on veoalajaamas toitetratoks V-ühendusega 20 MVA nimivõimsusega trafo. Igasse veoalajaama paigaldatakse neli trafot (4x20 MVA), mis moodustavad kaks V-ühendusega trafode gruppi, millest üks on reservtoiteks [19]. Joonisel 3.16 on toodud antud trafode mudeli ühendusskeem. Lisaks mainitud lahendusele leiab rakendust ka *Scott-trafo* (trafod võimsusega 25 + 20 MVA) [20].

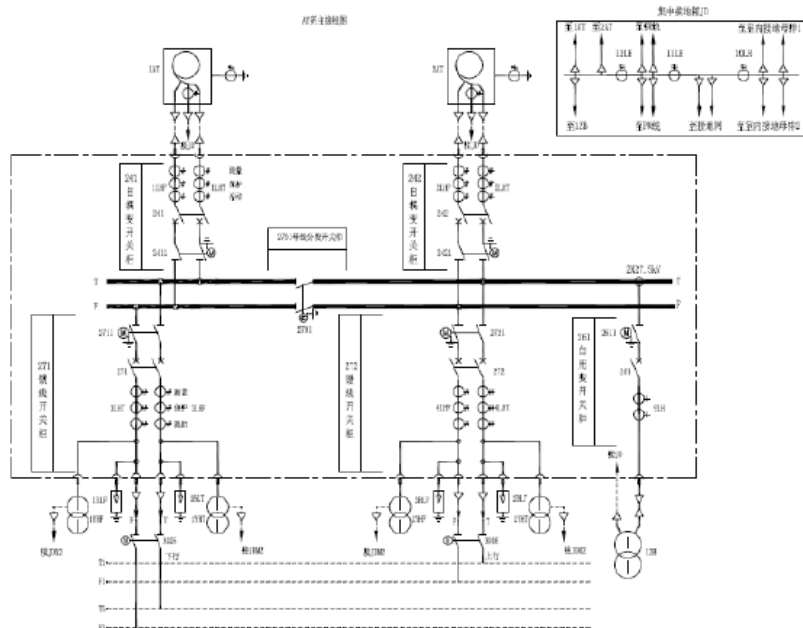
Hiinas veojõusüsteem on jagatud nelja toiteseksiooni. Kontaktsüsteem koosneb AT-d, kande-, kontakt-, tagasivoolu- ja kaitsejuhist ning relssidest ja maasse paigaldatud maandusjuhist [19]. Tüüpiline Hiina raudtee veojõuedastussüsteemi skeem on toodud joonisel 3.17 ja AT-punkti skeem joonisel 3.18.



Joonis 3.16. V-ühendusega trafode mudel [18]



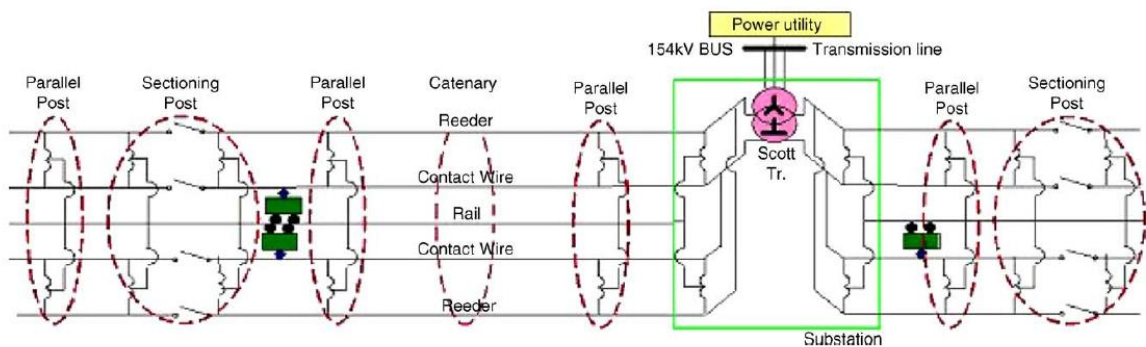
Joonis 3.17. Veolajaama skeem [19]



Joonis 3.18. Autotrafopunkti skeem [19]

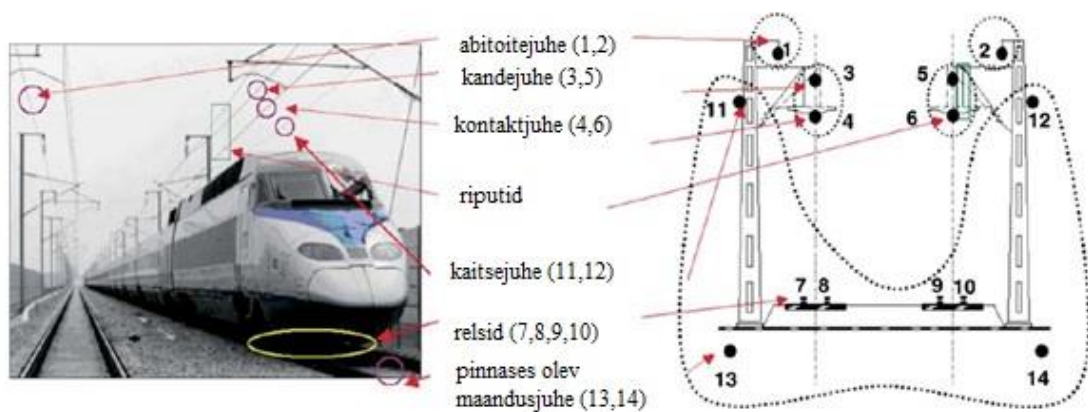
### 3.3.5 Korea 3/2 + 2x25 kV 50 Hz

Koreas konverteeritakse 3-faasiline riikliku ülekandesüsteemi 154 kV pingele *Scott-trafole* (50 MVA) ning sealt edasi abitoiteliinile, kontaktjuhtmele ja relssidele. *Scott-trafo* konverteerivad 154 kV pingele 55 kV pingele. Kontaktsüsteem jagab 55 kV pingele kontakt- ja tagasivoolujuhi vahel, vähendades pingele väärtuse rongile sobivaks 25 kV. Veoalajaamad paiknevad üksteisest 50 km kaugusel ja nende vahele on paigaldatud sektsioneerivad mastid. Viimastel asetsevate võimsuslülitite abil eraldatakse omavahel alajaamade vooluringid. Iga ca 10 km tagant on läbi võimsuslülitite süsteemi paigaldatud AT (1 MVA), luues edasi- ja tagasivoolu juhtide vahel rööpühenduse [20]. Joonisel 3.19 on toodud Korea AC elektriraudteesüsteemi skeem.



Joonis 3.19. Korea elektriraudtee süsteem [21]

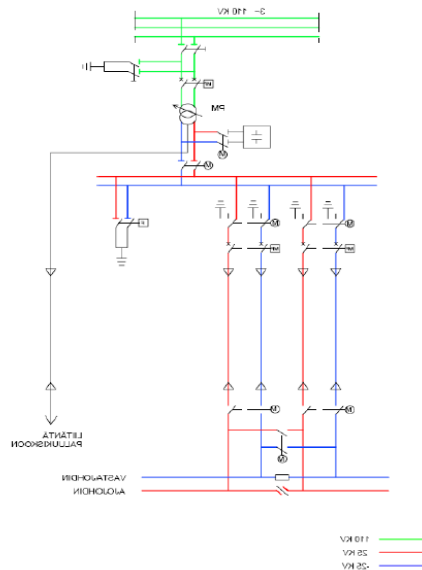
Kontaktliinisüsteem koosneb kontakt-, kande-, abitoite- ja kaitsejuhist ning relssidest ja maasse paigaldatud maandusjuhtidest (Joonis 3.20). Maandussüsteemis rakendatakse Koreas tüüpilist lahendust, kus relsid, kaitse- ja maandusjuhid on omavahel elektriliselt ühendatud [20].



Joonis 3.20. Kontaktliini juhtide paiknemine Korea elektriraudtee liinil [21]

### 3.3.6 Soome 1x25 kV ja 2x25 kV 50 Hz

Soome elektriraudtee kontaktnõrkudes kasutatakse nii 1-faasilist otsetoitega 25 kV süsteemi kui ka 2x25 kV süsteemi. Viimane variant on rakendust leidnud uuematel elektriraudteeliinidel. Ülekandesüsteemi pingeväärtuseks on Soomes 110 kV. Enamasti jäävad veolajaama toitepiirkonnad 20 kuni 80 km piiresse. Helsingi linnasiseses liinides on kasutusel 1x25 kV süsteem, mida toidetakse kahest veolajaamast trafodega 12,5 MVA (kokku toidab liini kolm trafot) [22]. Soome elektriraudtee veojõuedastuse toiteskeemi näide on toodud joonisel 3.21.



Joonis 3.21. Soome elektriraudtee 2x25 kV süsteemi toiteskeem ülekandevõrgust [22]

## 3.4 1x25 kV ja 2x25 kV süsteemide võrdlus

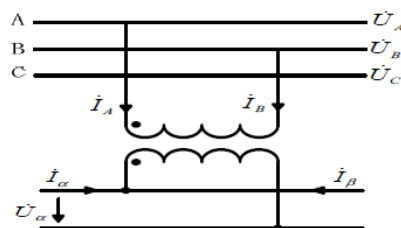
1x25 kV süsteemi rakendamine on lihtne nii konfiguratsioonilt, kui ka kaitse seisukohalt, koosnedes kontaktliinist ja tagasivooluahelast. Veojõusüsteem saab toite 3-faasilisest ülekandevõrgust läbi 1-faasilise trafo veolajaamas. Antud süsteemi suurimateks miinuseks on tekkiv koormuste ebasümmeetria ja relsi-maa vaheline lekkevool. Sideseadmete häiringute põhiliseks põhjustajaks olevat lekkevoolu on võimalik kuni 20% ulatuses vähendada, lisades kontaktliini tagastuva juhi, paraku jääb see enamasti ebapiisavaks kommunikatsiooniliinide ja -seadmete häirete likvideerimiseks [16]. Lisaks eeltoodule on 1x25 kV süsteemi puhul piiratud ka toitepunkti kaugus (ca 25 km), tulenevalt lubatavast pingelangu väärtusest liinides [7]. 1-faasilist süsteemi eelistatakse juhtudel, kus raudteeliini koormus on väike ning puuduvad kehtestatud piirangud häiringutele.

2x25 kV süsteemis jagatakse veolajaama pinget kontaktliini ja tagasivoolujuhi vahel. Raudteeliin on jagatud sektionideks, mida toidetakse liinile paigaldatud autotrafodega. Võimsust

edastatakse rongile veoalajaama ja veduri asukohale eelneva sektsiooni autotrafo vahelt. Kahe autotrafo vahelisel sektisoonil toidetakse rongi mõlemalt poolt, seega on antud süsteemis voolud liinis madalamate väärtustega ning sellest tulenevalt on ka häiringute tase ja pingekadu kontaktliinis madalam, võrreldes ühepoolse autotrafodeta toite korral. Madalamad väärtused voolus ja pingekaos võimaldavad kontaktliinides edastada suuremaid võimsusi, mis tõstab liinide töövõimet ja jõudlust. Teisest küljest nõuab aga parema veojõusüsteemi rakendamine suuremaid kulutusi. Seda süsteemi lisatavate autotrafode ja veoalajaama vahele tagasivoolujuhi paigaldamise ning kulukama releekaitse näol aga ka vastavalt kahele fiidrilike alajaama ehituse tõttu [7]. 2x25 kV süsteem vajab paigaldamisel ligi kaks korda suuremat maa-ala võrreldes 1x25 kV süsteemiga, seega ei saa seda rakendada väga kitsastes tingimustes [23]. 1x25 kV süsteem nõuab raudteeliinile rohkem veoalajaamu, kuid 2x25 kV süsteemis on trafode summaarne arv suurem (veotrafod ja autotrafod) [7].

### 3.5 Elektriraudtee süsteemides kasutatavad trafod

Elektriraudteeliinidel pole tegemist püsivate tarbijatega, seetõttu peavad veojõutrafod taluma suuri varieerumisi koormustes. Tulenevalt kõrgeast varustuskindluse nõudest raudteeliinidel peavad veojõutrafod vastu pidama võimalikele sagedastele välistele lühistele [24], kuna kontaktliinide näol on tegemist pikkade rikkealdis õhuliinilõikudega. 1-faasilise trafo (Joonis 3.22) rakendamine veoalajaamas veojõutoite edastamiseks rongile toob endaga kaasa kõige suurema koormuste asümmeetria olukorra [25].



Joonis 3.22. 1-faasilise trafo ühendusskeem [18]

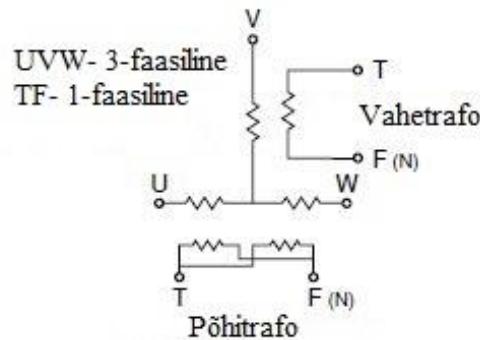
Olukorra vältimiseks leiavad kasutust eritüüpi trafoühendused, millest levinumad ja rohkem analüüsitud on:

- Scott-trafo
- V-ühendusega trafo
- tasakaalustatud trafo (*impedance matching balanced transformer*)
- Woodbridge trafo

- *Le Blanc* trafo

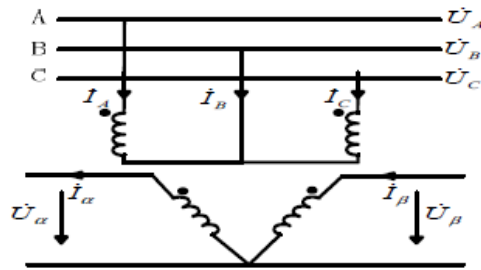
Järgnevalt tulevad kirjeldamisele eritüüpi trafod ja nende mõju süsteemile.

Raudteeliinidel kõige laialdasemalt kasutatud leidev eritüüpi trafo on *Scott-trafo* [24], mis konverteerib 3-faasilise toite ülekandevõrgust kaheks 1-faasiliseks (Joonis 3.23), kasutades selleks kahte 1-faasilist trafot – keskväljavõttega põhitrafo ja *teaser*-vahetrafo [24], [26]. Põhitrafo ühendatakse süsteemi kahe faasi vahele, vahetrafo aga põhitrafo keskväljavõtte ja süsteemi kolmanda faasi vahele [7]. *Scott-trafo* on leidnud laialdast kasutust tänu oma lihtsale ehitusele, kergele koormuspinge reguleerimisele ja 3-faasi vahelise ebasümmeetria vähendamisele. *Scott-trafo* kasutatakse laialdaselt 2x25 kV süsteemis autotrafodega kontaktvõrgu konfiguratsiooni korral. Hiinas, Jaapanis ja Koreas on veoalajaamades eelistatumaiks trafo tüübiks just *Scott-trafo* [26].



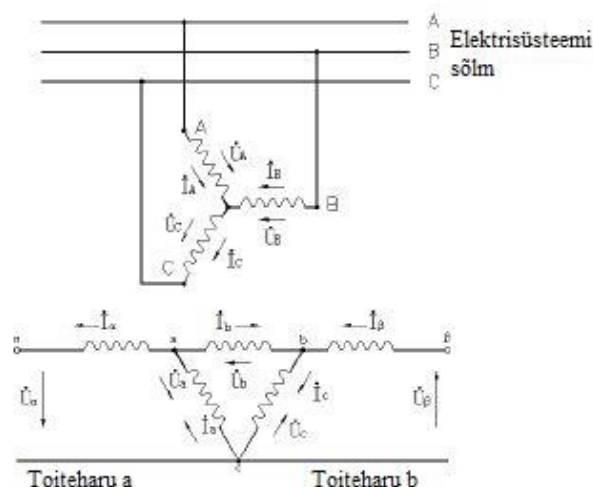
Joonis 3.23. *Scott-trafo* ühendusskeem [7]

V-ühendusega trafo (Joonis 3.24) koosneb kahest ühefaasilisest trafost (esineb ka 3-faasilist V-trafot), mis konverteerib sarnaselt *Scott-trafole* primaarpoole 3-faasilise toite kaheks 1-faasiliseks, viimased on omavahel faasinihkes  $60^\circ$  [24], [28]. V-ühenduse eeliseks on efektiivne veotrafo võimsuse rakendatavus tarbijate toiteks. Trafo ühendamine on lihtne ja kulutused küllaltki madalad. Normaal talitluses on võimalik trafo primaarpoole jaotlas säilitada 3-faasiline toide ning see võimaldab toita lisaks veojõualajaamale ka teisi piirkonna 3-faasilisi tarbijaid. Suurimaks miinuseks osutub veojõutrafo rikkeolukord, millal reservtrafo peaks toitma mõlemaid kontaktvõrgu ahelaid, kuni normaal toide taastatakse. Peale lülitusprotsessi omandab veoalajaam aga 1-faasilise ühenduse (1x25 kV süsteem) ning see toob kaasa vastujärgnevusvoolul väärtuse kasvu süsteemis [28].



Joonis 3.24. V-ühendusega trafo ühendusskeem [18]

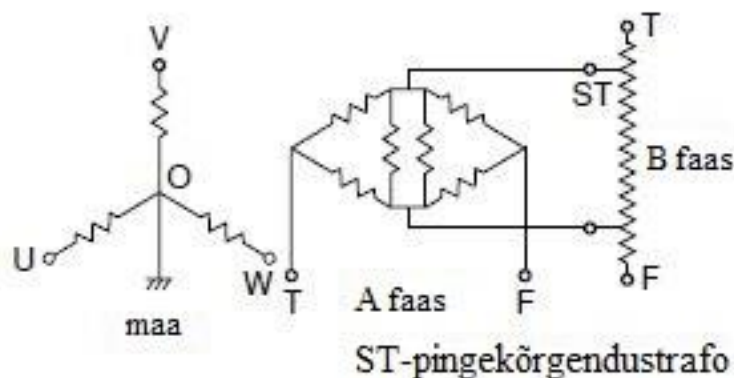
Tasakaalustatud trafo (*impedance matching balanced transformer/balanced transformer*) primaarmähis on ühendatud tähte. Trafo maandamata sekundaarpoolel on kaks omavahel kolmnurkühenduses lisamähist  $\alpha$  ja  $\beta$  (Joonis 3.25).  $\alpha$  ja  $\beta$  klemmid on ühendatud veojõusüsteemi, toites eraldi kahte veojõusektsiooni suunda. Kolmnurkühenduse sisemine klemm on ühendatud relsi või maandusvõrguga. Antud trafoühenduse eeliseks on selle võimsuse maksimaalne kasutus, kuna ülekandesüsteemi 3-faasilist toidet on võimalik täielikult konverteerida sekundaarpoole kahte faasi. Seega parandab trafo kolme faasi asümmeetria olukorda ja omab vähendavat mõju vastujärgnevusvoolule süsteemis. Tasakaalustatud trafo puhul on veoalajaamades reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus väiksem võrrelduna näiteks V-ühendusega, seega on ka kulutuse sellele väiksemad [27]. Samuti on mõjud pinge kõikumiste ja väreliste tekkimisele avalikus võrgus väiksemad. Paraku on tegemist ehituselt ja tootmisprotsessilt keerulise ning kalli lahendusega [27]. Uurimuse [27] tulemusena, mis analüüsib V- ja tasakaalustatud trafo rakendamist raudtee veojõusüsteemis, on leitud, et saavutamaks väiksemat elektriraudtee mõju ülekandesüsteemile tuleks veoalajaamades eelistada just viimast trafolahendust.



Joonis 3.25. Tasakaalustatud trafo ühendusskeem [28]



Lisaks eelpool mainitud eritüüpi trafodele kasutatakse veojõutoite edastamiseks ka *Le Blanc*'i, *Woodbridge* ja veel teisigi trafouhendusi. *Le Blanci* ühendus sarnaneb *Scott-trafole*, kus primaarpool on ühendatud kolmnurka ning sekundaarpoolel kasutatakse kahte mähis. *Woodbridge* trafo (Joonis 3.26) primaarpool on sümmeetrilises tähtühenduses, mida on võimalik maandada. Sekundaarpool edastab aga ebavõrdse efektiivväärtusega omavahel  $90^\circ$  nihkes olevaid pingeid. Sekundaarpoolel puudub ühine ühenduspunkt ning seega peab iga mähis toitma erinevat rööbast või tuleb relssidele lisada isoleerivad ühendused [29].

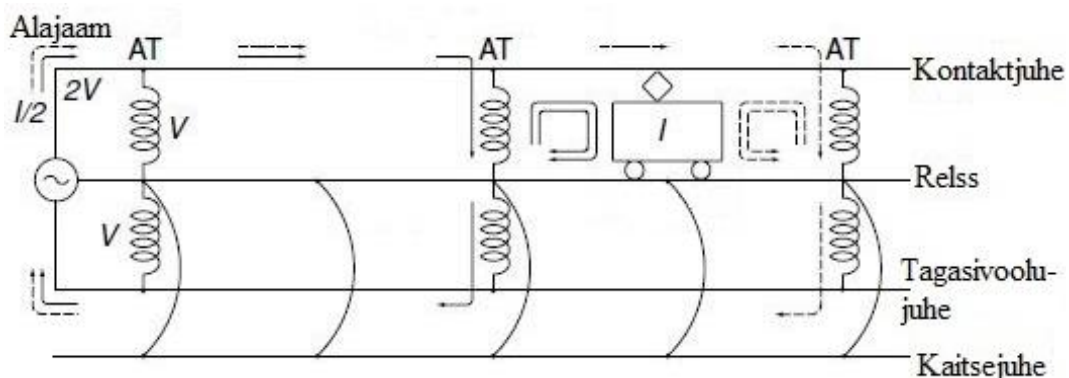


Joonis 3.26. *Woodbridge* trafo ühendusskeem [7]

Kokkuvõttena erinevate trafolahenduste võrdluseks on analüüsitud nende kasutamise mõju ülekandevõrgu pingele asümmeetrilise allikaga [25]. Saadud tulemustest ilmnes, et 1-faasilise trafoga otsetoitesüsteemi korral tekib võrgus kõige suurem pingete asümmeetria olukord. Allikas [30] tehtud modelleerimised näitasid, et *Scott*- ja *Le Blanc* trafo korral saavutati süsteemi pingete ja voolude tasakaalustamisel paremad tulemused, võrrelduna V-ühendusega trafo rakendamisel. Siinkohal tuleb aga rõhutada, et eritüüpi trafode roll elektriraudtee süsteemides on asümmeetria vähendamine, mitte aga selle täielik elimineerimine. *Scott*- ja *Le Blanc* trafouhendused on küll võimelised tagama süsteemis 3-faasilise sümmeetria, kuid seda juhul kui sekundaarpoolel mähisid on võrdselt koormatud, mida raudtee kontaktvõrkudes esineb harva. Enamasti võib selline olukord tekkida tiheda koormusega reisisiinidel, kus liigub palju ja tiheda graafikuga väikeseid ronge. Kaubaliinidel, kus on suured rongid ja hajutatud sõidugraafik ei ole praktiliselt vastavat olukorda võimalik saavutada. Seega sõltub tegelik asümmeetria hulk sekundaarmähis koormuste omavahelisest suhtest - mida võrdväärsemad on koormused trafo mõlemal mähisel, seda väiksem on tekkiv pingete asümmeetria [29].

### 3.6 Kontaktliinide auto- ja lisapingetrafod

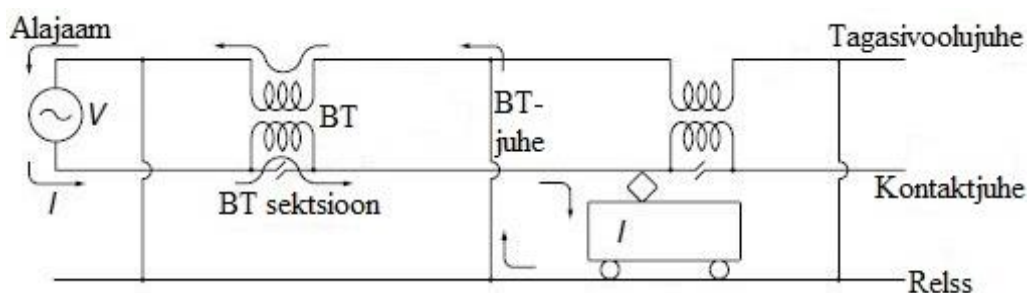
Raudteeliini kontaktvõrgu konfiguratsiooni valikut mõjutavad kehtestatud piirangud maaühendusvooludele ja elektromagnetiliste häiringute tasemele. Nimelt kasutatakse raudteede veoenergiastüstemides ülekande tõhustamiseks, aga eelkõige maaühendusvoolude ja elektromagnetiliste häiringute vähendamiseks, lisapinge- ja autotrafosid. Lisapingetrafod (BT) võeti esimesena kasutusele Jaapanis ning peale seda leidsid nad rakendust Suurbritannias, Rootsis ja vähe- mal määral ka Saksamaal [31]. Autotrafode (AT) lisamist süsteemi rakendati esmalt USA-s, edasi levis see Jaapanisse ning veidi hiljem juba ka Austraaliasse, Ungarisse ja Luksemburgi [6]. AT ühendatakse teatava intervalliga (10-20 km) kontaktvõrku kontakt- ja tagasivoolujuhi vahele, trafo keskväljavõtte ühendatakse raudteerööpaga (Joonis 3.27). Sellest tulenevalt peaks teoreetiliselt kogu vool kulgema kontakt- ja tagasivoolujuhis, mitte aga mööda rööpaid, välja arvatud parajasti vedurile toidet tagava kahe AT vahelises sektsioonis. Praktika on aga näidanud, et sellest hoolimata kuni 10% [7] koormusvoolust võib siiski kulgeda vabas liinisektsioonis mööda rööpaid. AT süsteemi korral toimub veojõu edastamine kõrgemal pingestmel, tõstes seeläbi veosüsteemi efektiivsust ning vähendades kadusid ja pingelangu alajaama ja rongi vahel. Sellest asjaolust lähtudes on võimalik rakendada suuremaid intervale (60-65 km) veoalajaamade vahel, mis on oluline elektrivarustuskindluse tagamiseks pikkadel raudteeliinidel ja piirkondades kus jaotusliinid paiknevad hõredalt [32], mõjutades seega ka vajaminevaid investimiskulusid. AT vahekauguse määramisel on oluline arvestada ka võimalike trafo tööseisakutega. AT-d peavad olema paigaldatud nii, et rongile oleks tagatud minimaalne tööpinge ka trafo tööseisaku korral [32]. Lisaks võimaldavad AT'd süsteemis paremat pingereguleerimist ja summutavad häiringuid, kuna tagastuv vool liigub mööda tagasivooluliini [15].



Joonis 3.27. AT süsteem [8]

BT'd paigaldatakse kontaktvõrgu õhuliini konstruktsioonile sarnaselt AT-ga, teatava intervalli (3-5 km) tagant. Trafo primaarmähis ühendatakse kontaktliiniga üle vahemiku ja sekundaarmähis tagasivoolujuhiga (Joonis 3.28). BT lisamisega vähendatakse oluliselt elektromagnetiliste häiringute taset võrgus, kuna kogu süsteemi tagastuv vool suunatakse relssidelt tagasivoolujuhti ja seega on indutseeritud pinge väiksem. Häiringute vähendamine saavutatakse paraku aga kehema pingeväärtuse arvelt, kuna BT näol on tegemist lisatakistusega liinis [16]. BT ei leia tänapäeval kuigi sagedast kasutus, seda just uute liinide planeerimisel, kuna omavad rida erinevaid puudusi. Nendeks on suur trafode, tagasivoolujuhtide ja lülitite arv, tuues kaasa kõrgemaid kulusi paigaldamisel ja kasutamisel. Lisaks vajavad mitme relsipaariga liinide puhul iga relsipaar eraldi trafosid. Nagu juba mainitud suureneb BT'de lisandumisel liini takistus, mis toob endaga kaasa suurenenud pingelangu ja võimususkaod kontaktliinides. Oluliseks osutub ka pantograafi liikumisel üle kontaktliini isolatsioonivahemike elektrikaare tekkimine, mis viib juhtmete ja detailide kiire kulumiseni ja suurendab sagedushäiringuid. Lisaks tuleb ära märkida, et kahe BT vahelises sektsioonis kust rong parajasti toidet saab ei osutu elektromagnetiliste häirete vähendamine piisavalt tõhusaks [7].

Analüüsis [33] on võrreldud AT ja BT kasutamist kontaktliinides ning välja on toodud olulisemad tulemused. Analüüs näitas, et ekvivalentne kontaktliini näivtakistus osutus AT korral pea kolm korda väiksemaks, võrrelduna samas võrgus BT kasutamisel. Sideliinidesse kanduv induktsioon oli aga nii AT kui BT korral peaaegu identne. Samuti osutus relsi potentsiaal maa suhtes mõlemas süsteemis sarnaseks. Küll aga selgus, et pingelang oli AT korral tunduvalt madalam ja laugelt kasvav vaadelduna rongi positsiooni kaugenemise seisukohast. BT korral oli pingelangu väärtus samas olukorras kasvult kiire ja ebastabiilne [33].



Joonis 3.28. BT süsteem [7]

Tabelis 3.2 on toodud AT ja BT peamised eelised ja puudused. Elektrivõrku saab tugevdada seadmete ühenduspunktide teineteisele lähemale paigaldamisega või vähendades nende vahelist näivtakistust, sellest tuleneval on kontaktliinides eelistatum AT süsteemi rakendamine [34].

Tabel 3.2. BT ja AT eelised ja puudused

	Lisapingetrafo (BT)	Autotrafo (AT)
EELISED	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lekkevoolu vähendamine</li> <li>• indutseeritud pinge vähendamine</li> <li>• elektromagnetiliste häirete vähendamine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lekkevoolu vähendamine</li> <li>• indutseeritud pinge vähendamine</li> <li>• elektromagnetiliste häirete vähendamine</li> <li>• pingelangu vähendamine rongi ja alajaama vahel</li> <li>• võimsuskao vähendamine</li> <li>• tagab parema pinge reguleerimise</li> <li>• pikemad vahemaad alajaamade vahel</li> <li>• süsteemi kõrgem efektiivsus</li> </ul>
PUUDUSED	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lisa takistus kontaktliinis</li> <li>• suurendab pingelangu kontaktliinis</li> <li>• võimsuskao suurenemine</li> <li>• elektrikaare teke isoleervahemikel</li> <li>• vahemikud kontaktliinis</li> <li>• häirete vähendamine ei ole teatud juhtudel piisav</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• süsteemi keerukus</li> <li>• keeruline releekaitse</li> </ul>

AT leiavad rakendust suurte koormustega kiirliinidel tänu pingelangu ja häiringute vähendamisele, mis võimaldavad suurendada alajaamade vahemaid ja liinide koormatavust, näiteks Prantsusmaal, Jaapanis, Venemaal [7] ja Koreas [26]. Kontaktliinis tekkiva pingelangu ja sektsioonide isoleervahemike tõttu on BT süsteemi võimalik rakendada ainult madala koormusega raudteedel. Küll aga vähendab BT lisamine kontaktvõrku tagastuva voolu väärtust relssidel ja maapinnas tunduvalt enam, kui ainult tagastuva juhiga süsteem. Antud asjaolu osutub oluliseks piirkondades, kus on suur pinnase eritakistus. Seega on BT süsteem kasutusel teatud spetsiifiliste tingimuste tõttu, näiteks Rootsis ja Norras [7].

### 3.7 Kokkuvõte

Balti riikide ja Euroopa raudteevõrgu ühildamiseks planeeritava Rail Balticu projekti võimalike mõjude uurimiseks elektrivõrgule on eelnevas peatükis uuritud erinevaid kasutusel olevaid elektriraudtee toitesüsteeme ja kontaktvõrgu lahendusi. Maailmas on saanud põhi- ja linnalähedastel liinidel standardseks elektriraudtee toitesüsteemiks AC 25 kV, 50 Hz. Vahelduvvoolu kontaktvõrgu süsteemidest eristatakse kolme peamist põhirühma, mida defineeritakse vastavalt veoalajaama paigaldatud trafo ja kontaktvõrgu konfiguratsiooni kaudu. Lihtsaimaks toitesüsteemiks on otsetoite ehk 1x25 kV süsteem, mida näiteks rakendatakse Hispaanias ja Soomes. Suure jõudlusega kiirraudteedel eelistatakse autotrafodega ehk 2x25 kV toitesüsteemi. Antud

süsteemi lahendust on kirjeldatud Jaapani ja Itaalia näitel. Kasutusel on ka eritüüpi trafoühendusi rakendavaid süsteeme ehk 3/2x25 kV toitesüsteeme, mida on kirjeldatud Hiina ja Korea näitel. Sobiva veojõusüsteemi valik tuleb teha tehnilis-majandusliku küsimuse alusel lähtudes süsteemi võimsusedastuse efektiivsusest ja pinge kvaliteedist ning häiringute summutamisest. Võrreldes omavahel kahte põhilist 1x25 ja 2x25 kV elektriraudtee toitesüsteemi, siis esimesel juhul on küll tegemist nii konfiguratsioonilt kui ka kaitseseisukohast lihtsaima süsteemiga, kuid teisest küljest on antud süsteemis suur lekkevool, mis põhjustab elektromagnetilisi häiringuid. 2x25 kV toitesüsteemi korral on häiringute tase ja pingekadu kontaktliinis madalam ning liinide töövõime ja jõudlus on suuremad, seega on 2x25 kV toitesüsteemi korral võimalik rakendada pikemaid vahemaid veoalajaamade vahel. Samas on antud süsteem kulukam kui 1x25 kV toitesüsteem.

Kontaktvõrgu süsteemi konfiguratsioonis on olulisel kohal ka veoalajaamas rakendatav trafo tüüp, kuna viimane omab mõju 1-faasilisest tarbijast tuleneva pinge asümmeetria vähendamisele elektrivõrgus. Kasutusel on eritüüpi trafoühendused, millest efektiivseimad ja laialdasemalt rakendust leidvad on *Scott*- ja *V*-ühendusega trafod. Rakendatakse veel tasakaalustatud trafot ning vähemal määral ka *Woodbridge* ja *Le Blanc* trafot.

Raudteede veoenergiasüsteemi ülekande tõhustamiseks, aga eelkõige maaühendusvoolude ja elektromagnetiliste häiringute vähendamiseks, lisatakse kontaktvõrku lisapinge- ja autotrafod. Lekkevoolu ja indutseeritud pinge vähendamisele omavad mõlemad süsteemid sarnast mõju. Autotrafodega veosüsteem on aga tänu kõrgemale pingeastmele efektiivsem, vähendades pingelangu ja kadusid liinides. Lisapingetrafode lisamisel kontaktvõrku on tegemist täiendava takistusega kontaktliinis, mis suurendab võimsuskadu ja pingelangu liinis.

### **3.8 Kirjandus**

- [1] Rail Baltic 1435 mm trassi Harju, Rapla ja Pärnu maakonnaplaneeringute keskkonnamõju strateegiline hindamine. Konsortsium: Raalprojekt, Hendrikson&Ko, KELPROJEKTAS, EA Reng, WSP.2013.
- [2] Rail Balticu raudtee teostatavusuuring. Peamised järeldused ja soovitused. Euroopa Komisjon Regionaalpoliitika Peadirektoraat. 2007.
- [3] Rail Balticu lõpparuanne. AECOM Transpordisektor. 2011.
- [4] Östlund, S., Electric Railway Traction. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2012.

- [5] Railway Technical Web Pages. Electronic Power for Trains. [Online]. <http://www.railway-technical.com/tract-02.shtml>
- [6] Hill, R. J., Electric railway traction. Part 3 Traction power supplies. IEE Power Engineering Journal, Vol.8, No. 6, December 1994, pp. 275-286.
- [7] Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Schneider, E. Contact Lines for Electric Railways. Erlangen, Publicis Publishing, 2009/2012, 994 pp.
- [8] Oura, Y., Mochinaga, Y., Nagasawa, H. Railway Electric Power Feeding System. Railway Technology Today 3. Japan Railway & Transport Review, June 1998, pp. 48-58.
- [9] Gunavardhini, N., Chandrasekaran, M., Sharmeela, C., Manohar, K. A Case Study on Power Quality Issues in the Indian Railway Traction Sub-Station. 7th International Conference on Intelligent Systems and Control, ISCO 2013, Coimbatore, Tamil Nadu, India, 4-5 January 2013, pp. 7-12.
- [10] Morimoto, H., Uzuka, T., Horiguchi, A., Akita, T. New Type of Feeding Transformer for AC Railway Traction System. PEDS 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Taipei, 2-5 November 2009, pp. 800-805.
- [11] Dolara, A., Gualdoni, M., Leva, S. Effect of primary High Voltage supply lines on the High Speed AC Railways Systems. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2010, Bergamo, 26-29 September 2010, pp. 1-8.
- [12] Brenna, M., Foiadelli, F., Zaninelli, D. Electromagnetic Model of High Speed Railway Lines for Power Quality Studies. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010, pp. 1301-1308.
- [13] Mariscotti, A., Pozzobon, P., Vanti, M. Distribution of the Traction Return Current in AT Electric Railway Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005, pp. 2119-2128.
- [14] Cella, R., Giangaspero, G., Mariscotti, A., Montepagano, A., Pozzobon, P., Ruscelli, M., Vanti, M. Measurement of AT Electric Railway System Currents at Power-Supply Frequency and Validation of a Multiconductor Transmission-Line Model. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1721-1726.
- [15] Agarwal, K., Candlish, S., Carney, T. Automatic Fault Location and Isolation System for the Electric Traction Overhead Lines. 2002 ASME/IEEE Joint Railroad Conference, Washington, DC, 23-25 April 2002, pp. 117-122.
- [16] Ho, T.K., Chi, Y.L., Wang, J., Leung, K.K., Siu, L.K., Tse, C.T. Probabilistic load flow in AC electrified railways. IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 152. No. 4, July 2005, pp. 1003-1013.

- [17] Uzuka, T. Faster than a Speeding Bullet. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 1, No. 1, September 2013, pp. 11-20
- [18] Zhengqing, H., Yuge, Z., Shuping, L., Shibin, G. Modeling and Simulation for Traction Power Supply System of High-Speed Railway. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Wuhan, 25-28 March 2011, pp. 1-4.
- [19] Zhengqing, H., Shuping, L., Shibin, G., Bo, Z. Protection scheme for China High-Speed Railway. 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection. Managing the Change, DPSP 2010, Manchester, 29 March - 1 April 2010, pp. 1-5.
- [20] Guihua, H., Weirong, C., Yankun, L., Yang, Z. Simulation of traction transformer based on PSCAD/EMTDC. *IEEE Power Engineering and Automation Conference, PEAM 2011*, Wuhan, 8-9 September 2011, pp. 132-135.
- [21] Hamin, L., Gildong, K., Sehchan, O., Gilsoo, J., Sae-hyuk, K. Fault analysis of Korean AC electric railway system. *Electric Power systems Research*, Vol. 76, No. 5, March 2006, pp. 317-326.
- [22] Heine, P., Hyvärinen, M., Niskanen, J., Oikarinen, A., Renner, H., Lehtonen, M. The Impact of 50 Hz Railroad Systems on Utility System Power Quality. *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, PQ 2010*, Kuressaare, 16-18 June 2010, pp. 61-66.
- [23] Senol, I., Görgün H., Gürkan Aydeniz, M. General comparison of the electrical transportation systems that are fed with 1x25 kV or 2x25 kV and expectations from these systems. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 1998, Tel-Aviv, 18-20 May 1998, Vol.2, pp. 885-887.
- [24] Chen, T.H., Kuo, H.-Y. Network modelling of traction substation transformers for studying unbalance effects. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol.152, No.2, March 1995, pp. 13-108.
- [25] Kalantari, M., Sadeghi, M. J., Fazel, S.S., Farshad, S. Investigation of Power Factor Behavior in AC Railway System Based on Special Traction Transformers. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Vol.2, No.11, November 2010, pp. 618-626.
- [26] Hanmin, L., Sehchan O., Gildong K., Cheonheon, A. A Study on the Equivalent Conductor Representation of AC Electric Railway System. *International Conference on Information and Multimedia Technology, ICIMT 2009*, Jeju Island, 16-18 December 2009, pp. 33-37.

- [27] Moxue L., Jinghan H., Le, Y. Developments in Digital Simulation of Traction Transformer. 43rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2008, Padova, 1-4 September 2008, pp. 1-4.
- [28] Yu, H., Yue, Y., Zhe, C., Zhifei, C., Ye, T. Research on the Selection of Railway Traction Transformer. 2010 Conference Proceedings IPEC, Singapore, 27-29 October 2010, pp. 677-681.
- [29] Kneschke, T. A. Control of Utility System Unbalance Caused by Single-Phase Electric Traction. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 6, November 1985, pp. 1559-1570.
- [30] Aihara, Y., Miyazawa, R., Koizumi, H. A Study on the Effect of the Scott Transformer on the Three-phase Unbalance in Distribution Network with Single-phase Generators. 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2012, Aalborg, 25-28 June 2012, pp. 283-290.
- [31] Ross, B. A Survey of Western European AC Electrified Railway Supply Substation and Catenary System Techniques and Standards. IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. IGA-7, No. 5, September 1971, pp. 666-672.
- [32] Kneschke, T. A. Simple Method for Determination of Substation Spacing for AC and DC Electrification Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 4, July 1986, pp. 763-780.
- [33] Varju, G. Comparison of the booster transformer and auto transformer railway feeding systems. Feeding features and induction to telecom lines. EMC York, 2004.
- [34] Abrahamsson, L., Söder, L. Fast Estimation of Relations Between Aggregated Train Power System Data and Traffic Performance. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, No. 1, January 2011, pp. 16-29.



## 4. Kontaktvõrkude mõju elektri kvaliteedile

Sõltuvalt elektriraudteeliinil rakendatavast kontaktvõrgu süsteemist avaldab viimane olulist mõju nii raudteeliini toitesüsteemile kui ka kogu elektrivõrgule. Peatükis 4 on eraldi välja toodud kontaktvõrkudes esinevad probleemid ja suuremad mõjud ning nende ulatus elektri kvaliteedile, mida tuleb silmas pidada elektriraudteesüsteemi elektrivõrku ühendamisel tulenevalt selle eripäradest.

### 4.1 Üldist

1-faasiliste tarbijate puhul on suurimaks probleemiks süsteemi asümmeetria, mis mõjutab süsteemis töötavaid generaatoreid ja teisi tarbijaid. Pinge asümmeetria on elektri kvaliteedi näitaja mida väljendatakse pinge vastu- ja pärijärgnevuskomponendi suhtena. Vastujärgnevuskomponenti genereerivad võrku vedurid ning see häirib tarbijate, eelkõige mootorite talitlust. Lisaks suurendab vastujärgnevusvool võimsuskadusid ning põhjustab valehäireid releekaitstes. Vastujärgnevuskomponendi suurus raudteevõrgus sõltub trafo tüübist [1], mida on põhjalikumalt uuritud allikas [2]. Pinge asümmeetriat vaadeldakse pikemalt peatükis 4.2.

Teiseks suureks probleemiks raudteeliinides on elektromagnetilised häiringud, millede peamiseks põhjustajaks on maauhendusvool. 40-100% [3] kogu tagastuvast voolust kulgeb elektriraudteel mööda rööpaid ja maapinda, põhjustades nii mittesoovitavaid häiringuid naabruses paiknevates kaablites ja liinide lähistelega paigaldatud sideseadmetes [4]. Lisaks maauhendusvoolu mõjule esinevad sideliinides ka indutseeritud häiringuid, mis tekivad paralleelselt sideliinidega paigaldatud kontaktliini tõttu, kus viimases veduri möödaskõigul voolu väärtus suuresti muutub [5].

Märkimist väärib ka elektrirongi poolt kontaktvõrku edastatavate harmoonikute määr. Peamiseks harmoonikute allikaks raudteeliinides on eelkõige rongi mehaaniline süsteem aga ka ajamid, katkematud toiteallikad (*UPS*) ja jõuelektroonika muundurid [6]. Läbi kontaktliinide kanduvad pinge ja voolu lainekuju moonutused rongilt ja seadmetelt edasi võrku. Kuna kontaktliinide näol on tegemist *RLC* ahelaga, siis on märkimisväärne oht resonantsi tekkeks, mis omakorda võimendab harmoonilisi moonutusi. Süsteemis levivate harmoonikute määra käsitletakse täpsemalt peatükis 4.3.

Üheks probleemiks ja arutelu kohaks elektriraudteesüsteemides osutub regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutamine veduritel. Antud süsteem vähendab küll elektrirongi poolt tarbitavat elektrienergiat, kuid teisest küljest on tegemist dünaamilise protsessiga, mille käigus muutub

elektrienergiavoo suund ja pinge väärtus. Regeneratiivse pidurdussüsteemi rakendamine avaldab mõju elektrivõrgu stabiilsusele. Antud süsteemi kasutamist ja selle mõju vaadeldakse peatükis 4.4.

Kontaktvõrgus esineb ka konstruktsioonilisi probleeme, kuna tegemist on komplekse õhuliinisüsteemiga, mis peab tagama toite pidevas liikumises olevale tarbijale. Energia vahendajaks õhuliini ja rongi vahel on viimasele paigaldatud pantograaf, liikuv mehaaniline seade. Katkesteta veoenergia tagamiseks on oluline püsiv ja kvaliteetne vastastikune toime kontaktliini ja pantograafi vahel, mille efektiivsust vähendavad rongi liikumine ja mehaaniline vibratsioon, liini ebahütlus ja võimalikud konarused kontaktliinis [7]. Nõrk ühendus ja katkestused kontaktliini ja pantograafi vahel toovad endaga kaasa sädeluse ja elektrikaare tekkimise, mis omakorda põhjustab detailide vananemist ja tekitab seadmetele mehaanilist stressi. See aga suurendab veelgi enam elektrikaare tekkimise tõenäosust. Halb ühendus kontaktliini ja pantograafi vahel toob lisaks juba mainitule endaga kaasa ka toite kvaliteedi alanemise, näiteks lisanduvate kõrgemate vooluharmonikute näol [8]. Katkemiste tõenäosuse vähendamiseks on vaja tugevdada kahe süsteemi vahelisi kontaktjõude, mistõttu paigaldataksegi kontaktliinisüsteemi lisaks kontaktjuhtidele ka kandejuhe. Viimane toetab koos riputitega kontaktjuhti tagades nii piisava kontaktjõu kontaktliini ja pantograafi vahel [8]. Ebahütlust kontakti pantograafi ja kontaktliini vahel vaadeldakse lähemalt peatükis 4.5.

## 4.2 Pinge asümmeetria

Pinge asümmeetria oma üldises tähenduses on mitme faasilise elektrisüsteemi talitlusrežiim, kus faasi või ka liinipingete väärtused ning ka faasipingete nihkenurgad ei ole võrdsed ega sümmeetrilised. Asümmeetriat iseloomustab asümmeetriategur  $k_a$  ehk pinge vastu järgnevus- ja pärijärgnevuskomponendi suhe (4.1) [9].

$$k_a = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Asümmeetriategurit on võimalik leida ka faaside vaheliste pingete kaudu, kasutades selleks võrrandit (4.2) [9].

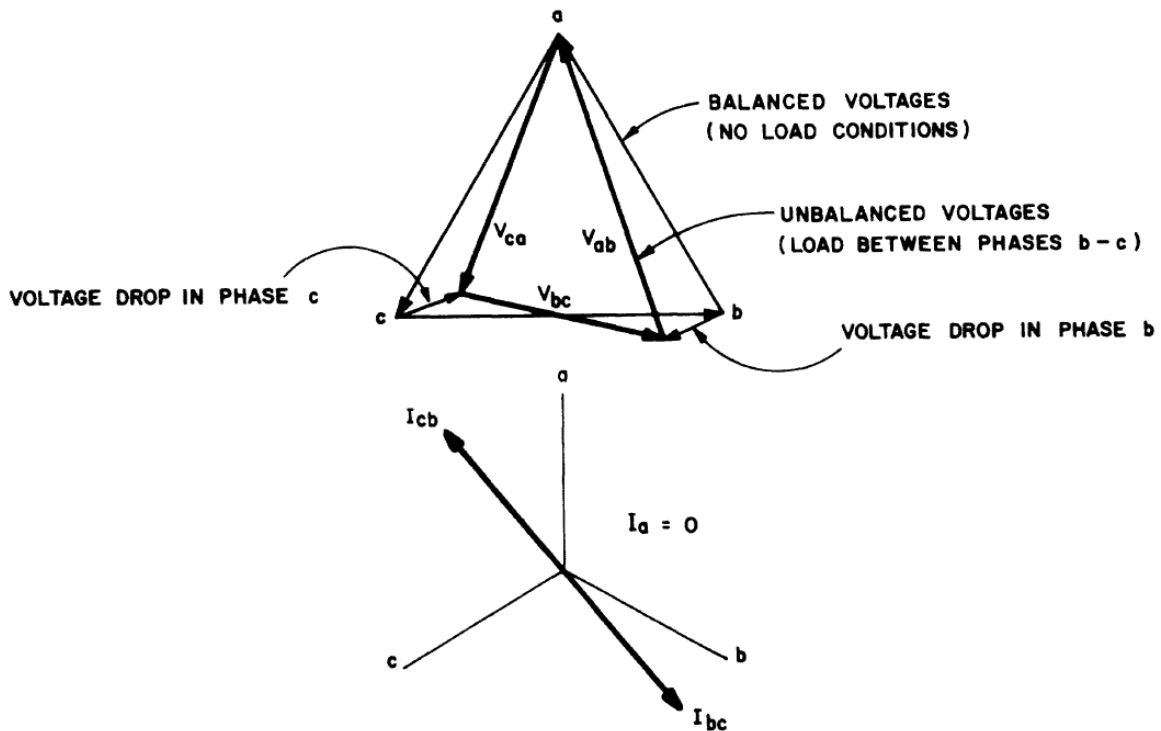
$$k_a = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad \text{kus } \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad (4.2)$$

Euroopa standardiga EN50160 [10] on normaaltalitusel kehtestatud asümmeetriaale piirväärtus, mille kohaselt ei tohi vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutiline keskvärtus

madal- ja keskpingel ületada 2% (mõningate mõõndustega sõltuvalt võrgu ehitusest kuni 3%) ning kõrgepingel 1% pärijärgnevskomponendist iganädalastel mõõtmistel 95% juhtudest. Riigiti on aga kehtestatud lubatud pingesümmeetria määrale omad normid. Näiteks Suurbritannias on erinevalt Euroopa standardist kõrgepingel lubatud asümmeetria väärtuseks kuni 2%. Prantsusmaal on kiirraudteeliinide korral kehtestatud eraldi normid, mille kohaselt on lühiajalisel (vähem kui 15 min) lubatavaks asümmeetria väärtuseks kuni 1,5% ning pikemaajaliselt 1% [11].

Pinge asümmeetria toob endaga kaasa elektrivõrgu püsitalitusprobleeme, vähendades võrgu ülekandevõimet ja avaldades negatiivset mõju tundlikele tarbijatele. Elektrirongi puhul on tegemist 1-faasilise, muutuva ja pidevas liikumises oleva tarbijaga. Ülekandevõrgu kaks faasi on koormatud elektriraudtee koormusega, mistõttu väheneb elektrivõrgu ülekandevõime ülejäänud kolmefaasilistele tarbijatele, kuna puudub võimalus koormata kolmandat ülekandevõrgu vaba faasi sarnase koormusega. Pinge asümmeetria toob endaga kaasa vastujärgnevusvoolu leviku võrgus. Viimane kujutab ohtu nii elektriseadmete kui ka –võrgu efektiivsele ja ohutule talitlusele. Vastujärgnevusvool suurendab elektriseadmete ja –liinide kadusid, vähendab trafode ja generaatorite efektiivvõimsust ning toob kaasa valelülitustoiminguid releekaitstes [1]. Lisaks juba mainitule võib vastujärgnevusvool põhjustada ka mootorite ja generaatorite ülekuumumist, vibratsiooni ning müra, mille tulemusena väheneb seadmete eluiga märgatavalt [9], [11]. Pinge asümmeetria tekkimist käsitletakse põhjalikumalt allikas [12].

Elektriraudteesüsteemi 25 kV AC 50 Hz liinide vaheline ühendus tekitab elektrivõrgus uue püsitalitusrežiimi, mille tõttu muutuvad oluliselt faasipingete ning liinipingete väärtused, kui ka faasinihke nurgad. Artiklis [12] kirjeldatud vektordiagrammid on toodud joonisel 4.1. Joonisel 4.1 esitatud vektordiagrammidel on kujutatud sümmeetrilise talitluse vektoreid peene joonega ning asümmeetrilise talitluse vektoreid jämeda joonega. Koormusvoolude vektordiagrammil on kujutatud faaside  $b$  ja  $c$  vahele ühendatud elektriraudtee poolt tekitatud voolukomponendid  $I_{bc}$  ja  $I_{cb}$ , mille nihkenurgad erinevad oluliselt sümmeetrilistest koormusvoolude  $a$ ,  $b$  ja  $c$  omadest.



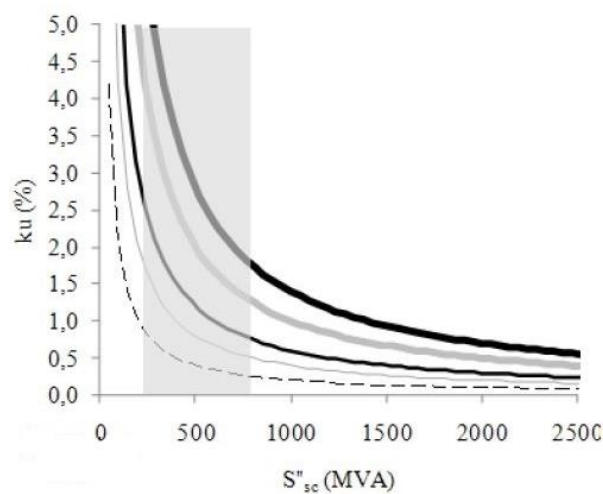
Joonis 4.1. Pinge ja voolu vektordiagrammid liitumispunktis sümmeetrilise ning elektriraudtee poolt põhjustatud asümmeetrilise koormuse järgselt [12]

Vektordiagrammide võrdlus näitab, et pingektor  $V_{bc}$  orienteerub koormusvoolude järgi, kuna nendest tulenevalt esinevad pingelangud faasides  $b$  ja  $c$ . Faasipingete muutumise tõttu vähenevad liinipingete  $V_{bc}$  ja  $V_{ca}$  amplituudväärtused ning nihkenurgad, kuid samas jääb muutumatuks  $V_{ab}$ . Võrreldes sümmeetrilise talitlusega tekib elektriraudtee koormuse lisandumisega oluline pingeparameetrite moonutus [23].

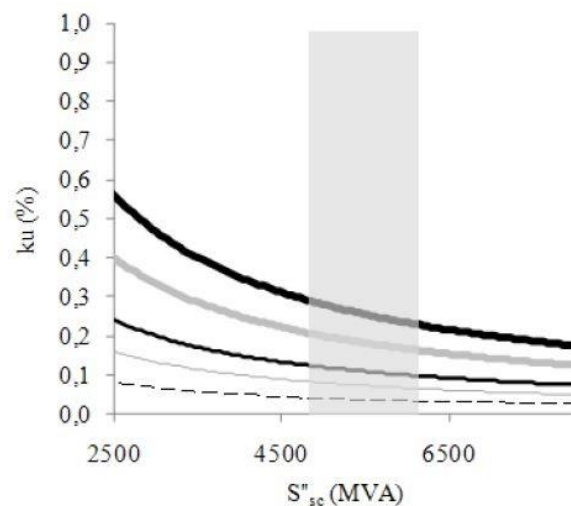
Joonisel 4.1 kujutatud muutuste tõttu tekkinud pinge asümmeetriat on keeruline kompenseerida klassikaliste meetoditega, kuna üheaegselt on tarvis kompenseerida kolme erinevat parameetrit. Seetõttu puudusid ka 25 kV AC 50 Hz elektriraudteesüsteemi käiku võtmisel lahendused pinge asümmeetria lahendamiseks ning selle osatähtsust püüti lihtsalt minimaalse tasemeni viia.

Pinge asümmeetriat on uuritud ja analüüsitud erinevate riikide veojõuvõrkudes sõltuvusena nii võrgu konfiguratsioonist ja tugevusest kui ka kasutatavatest veojõutrafodest [1], [9], [11], [13], [14]. Uurimuses [9] käsitletakse veojõu poolt põhjustatud asümmeetriat Soome elektrivõrgu kahes erinevas piirkonnas, Kainuu ja Helsingi. Kainuu puhul on tegemist maapiirkonnaga, kus liiguvad raudteedel valdavalt kaubarongid ning mille ülekandevõrk on suhteliselt nõrk. Helsingi puhul on tegemist vastupidise olukorraga. Elektrivõrk on tihe ja tugev ning valdavalt on raudteedel tegemist reisijate veoga. Uurimustöös vaadeldi erinevate võimsustega rongide liikumisel eri võrguosades tekkivat pinge asümmeetriat. Nii arvutuslike kui ka mõõtmiste tulemusena leiti,

et tekkiv asümmeetria väärtus on sõltuvuses võrgu lühisvõimsusest. Joonised 4.2 ja 4.3 kajastavad arvutuslikku sõltuvust, kus on vaadeldud vedureid võimsustega 2 – 14 MVA. Kainuu piirkonna võrgu lühisvõimsus on suurusjärgus 500 MVA ning Helsingi piirkonnas 5000 MVA. Joonistelt 4.2 ja 4.3 on näha, et näiteks 2 MVA võimsusega veduri korral on tekkiv pinge asümmeetria Kainuu piirkonnas 0,4% ja Helsingi piirkonnas 0,04%. Võimsusega 10 MVA veduri korral on asümmeetria väärtused vastavalt 2% ja 0,2%. Uurimuse käigus teostatud mõõtmised näitasid sarnaseid tulemusi arvutuslike väärtustega [9]. Pinge asümmeetria oli kõrgem Kainuu, kui nõrgemas võrgupiirkonnas ning madalam suurema lühisvõimsusega tugevas Helsingi võrgupiirkonnas.



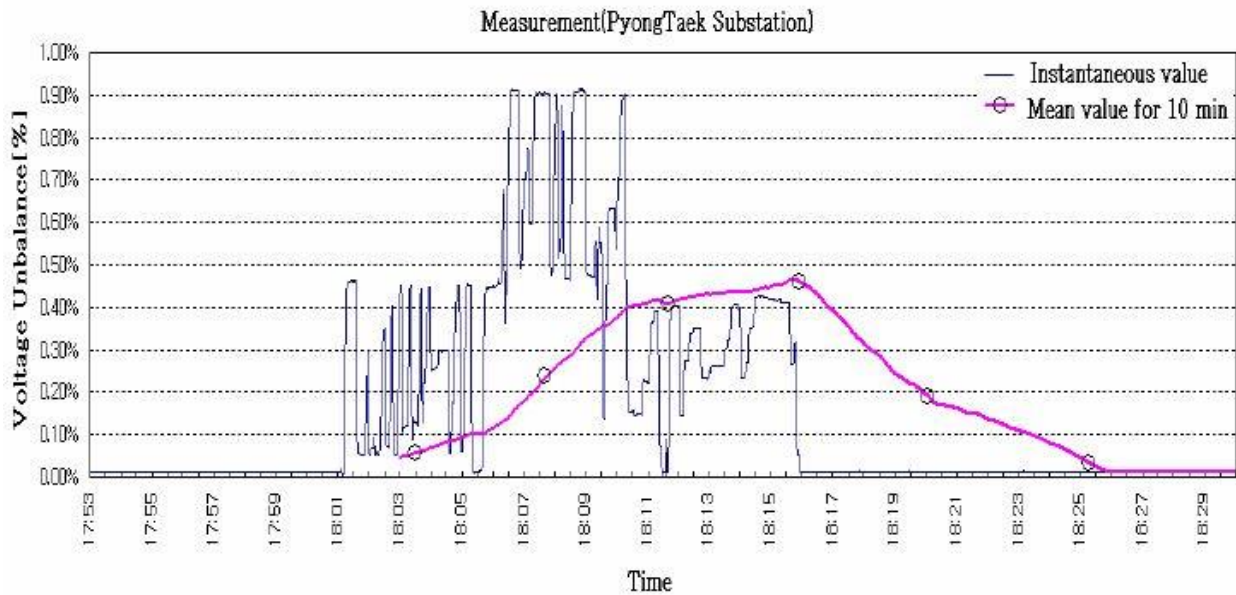
Joonis 4.2. Arvutuslik  $k_u$  sõltuvusena lühisvõimsusest  $S''_{sc}$  Kainuus [9]



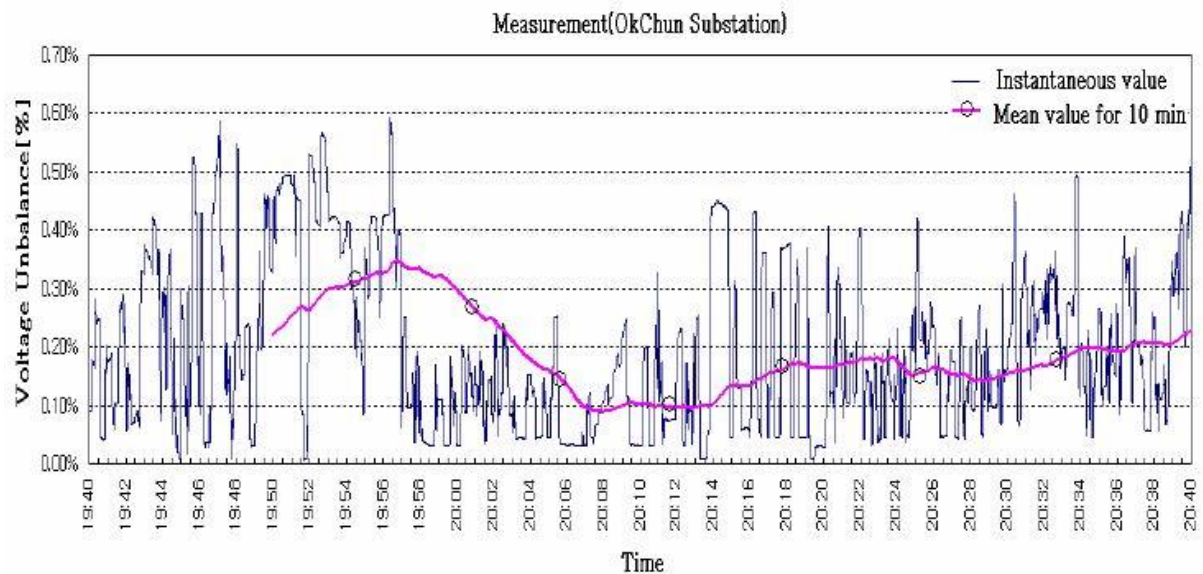
Joonis 4.3. Arvutuslik  $k_u$  sõltuvusena lühisvõimsusest  $S''_{sc}$  Helsingis [9]

Järeldusena võib öelda, et võrgus tekkiv pinge asümmeetria sõltub veduri võimsusest ja võrguosa tugevusest [9].

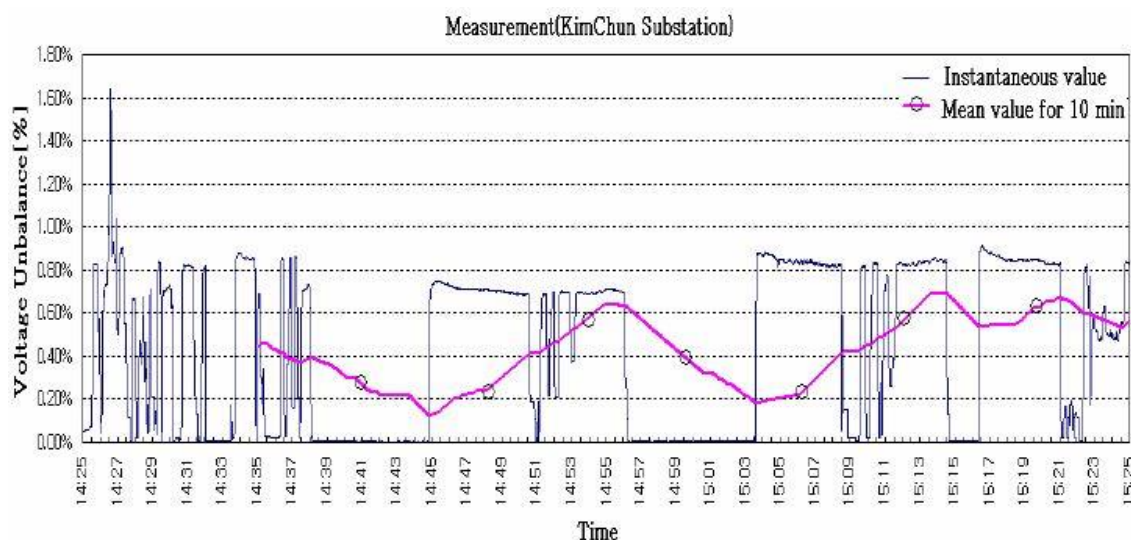
Koreas on raudteeteenust reguleeriva asutuse poolt kehtestatud pinge asümmeetria määraks 1% [13]. Uurimus [13] vaatleb pinge asümmeetria levikut Korea elektrivõrgus veojõusüsteemi eripärast tulenevalt. Uurimise käigus tehti mõõtmisi Gyongbu kiirraudteeliinil erinevates alajaamades. Mõned saadud tulemusi kajastavad graafikud on toodud joonistel 4.4 – 4.6.



Joonis 4.4. Pinge asümmeetria mõõtetulemus Korea Gyongbu kiirraudteeliini PyongTaek alajaamas [13]



Joonis 4.5. Pinge asümmeetria mõõtetulemus Korea Gyongbu kiirraudteeliini OkChun alajaamas [13]



Joonis 4.6. Pinge asümmeeria mõõtetulemus Korea Gyongbu kiirraudteeliini KimChun alajaamas [13]

Uurimuse [13] tulemustest selgub, et hoolimata reaalajas mõningatest kõrgematest asümmeeria väärtustest, on Korea elektrivõrk piisavalt tugev ning pinge asümmeeria 10-minutilised keskvaartused jäävad alla 1%, mis on lubatud piiriks.

Eelpool mainitud analüüsid näitavad, et veojõukoormuse eripärast tulenevalt on oluline hinnata elektrivõrgus tekkivat pinge asümmeetriat ning selle väärtuse jäämist normeeritud piiridesse. Pinge asümmeeria hindamiseks ja selle mõju analüüsimiseks on tähtis teada kui tugevasse ja stabiilsesse elektrivõrgu piirkonda raudteeliini veojõutrafad ühendatakse.

### 4.3 Toitepinge harmoonikud

Harmoonikud põhjustavad moonutusi pinge ja voolu siinuselises lainekujus ning omavad seetõttu mõju võimsuse edastusele kontaktliinis. AC elektriraudteesüsteemis on voolu ja pinge lainekuju moonutuste peamiseks põhjustajaks rong ja selle seadmed [15], näiteks pantograafi libisev kontakt, *PWM* (*pulsewidth-modulation*) ajam, katkematu toite allikas (*UPS*), rongi mehaaniline süsteem ja jõuelektroonika muundurid [16]. Elektrirongide poolt võrku edastatavad harmoonikud levivad kontaktliinide vahendusel veojõu edastamisel elektrisüsteemi [15]. Võimalik on ka resonantsnähtuse tekkimine, kuna kontaktliinide puhul on tegemist *RLC* vooluringiga. Harmooniku ja resonantsi sageduse kokkulangemisel võimenduvad lainekuju moonutused veelgi. Tagajärjeks on mitmed probleemid, näiteks elektromagnetilised häiringuid lähedal paiknevates sideliinides ja signaalsüsteemides, valeoperatsioonid kaitseadmetes, vibratsioonid jõukondensaatorites, soojuskaod trafodes ja õhuliinides, ülekuumenemine ning võimalikud liigpinged ja –voolud [15], [16], [17]. Sellest tulenevalt osutub elektriraudteeliini planeerimisel

oluliseks ka võrgus levivate harmoonikute hindamine [1]. Kuna tegemist on kahe erineva nimi-  
parameetritega süsteemiga, siis osutub harmoonikute taseme võrdlus keeruliseks. Selleks kasu-  
tatakse harmoonimoonutustegurit *THD* (*total harmonic distortion*), mida arvutatakse järgnevate  
avaldistega (4.3) [18],[19].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} U_h^2}}{U_1} \cdot 100; THD = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}}{I_1} \quad (4.3)$$

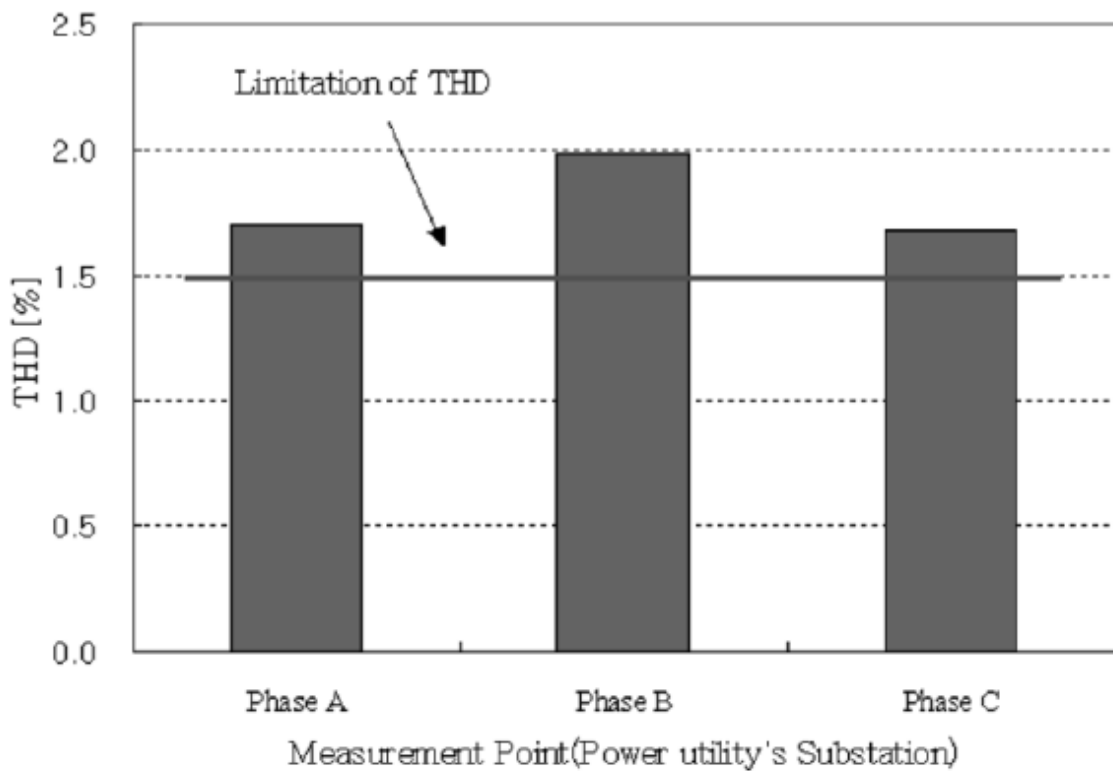
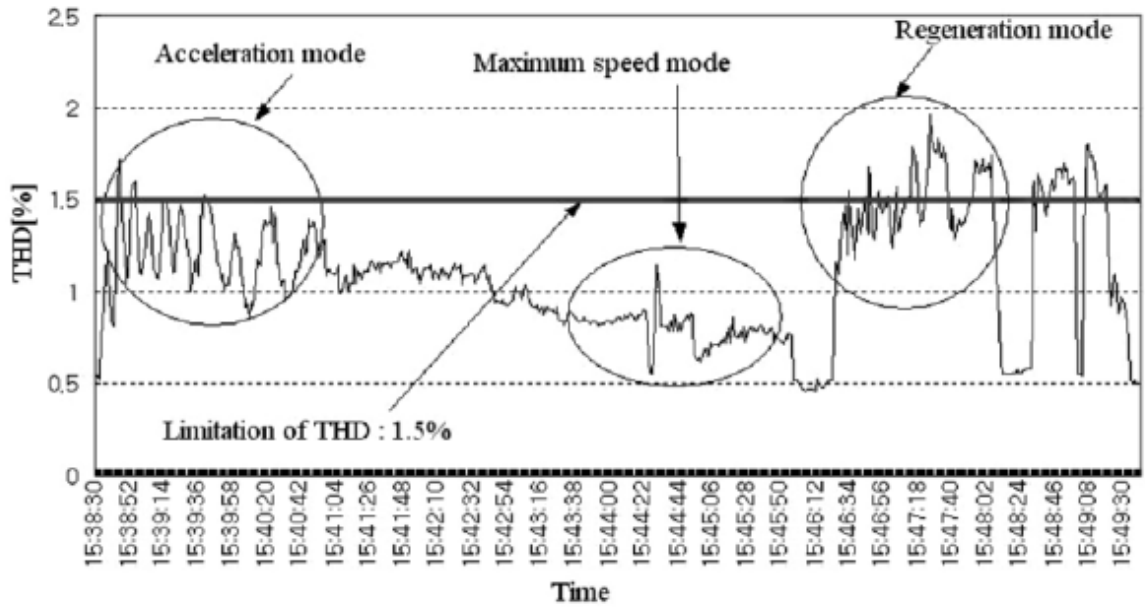
kus  $h$  – harmooniku järk;

$U_1$  – põhikomponendi lainekuju;

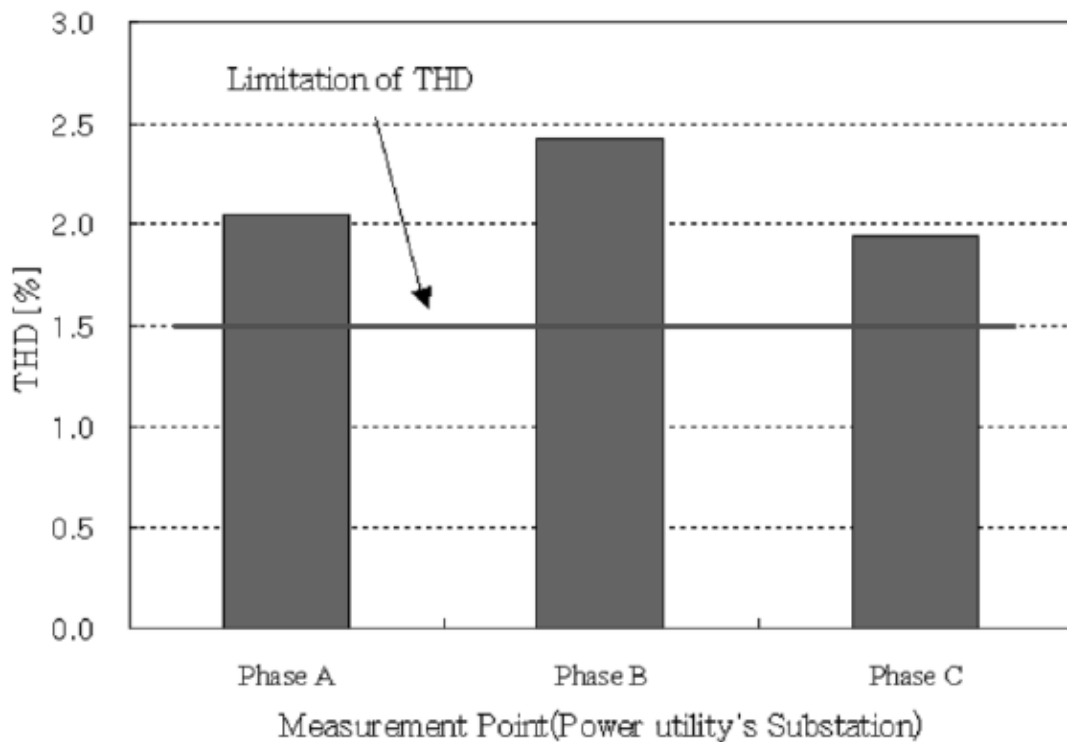
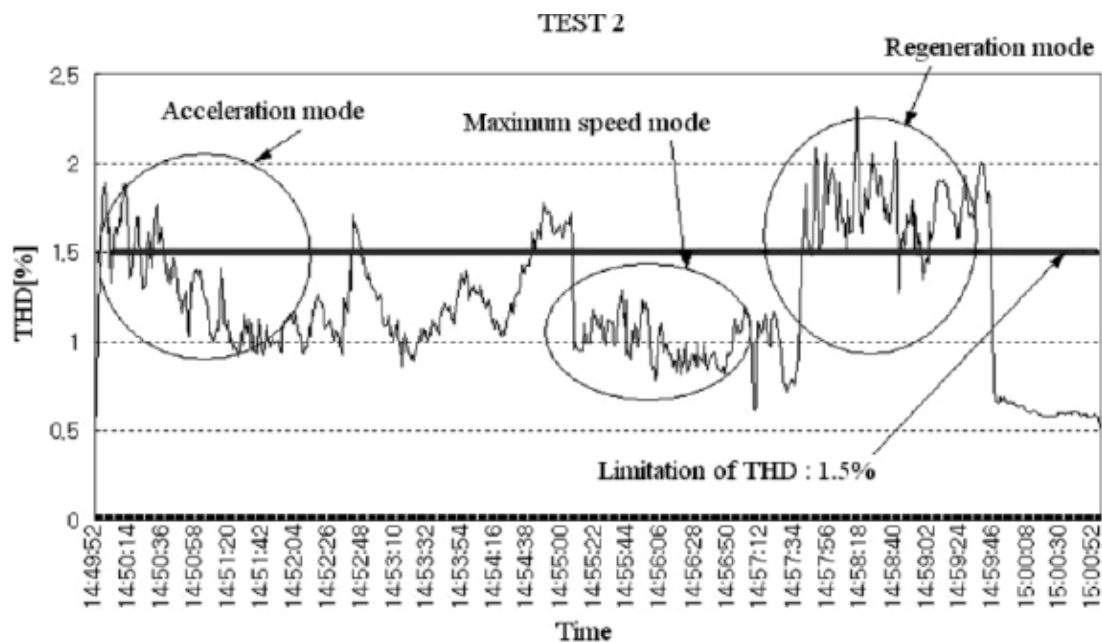
$U_h$  –  $h$ -nda harmooniku lainekuju.

Järgnevalt vaatleme kirjanduses leitud harmoonikute taseme analüüse veojõusüsteemides.  
Uurimus [15] analüüsiti harmoonikute taset Korea kaheerööpmelise elektrifitseeritud kiirraudtee  
süsteemis, mis saab toite ülekandevõrgu 154 kV pingestmel. Veojõuvõimsust edastatakse läbi  
*Scott-trafode* ning kontaktliinidele on paigaldatud autotrafod. Tulemustest ilmnes, et volukuju  
moonutus on funktsioon rongi asukohast süsteemis ning mida kaugemale rong vealajaamast  
jõuab, seda suurem on harmoonikute amplituudväärtus. Ühtlasi ilmnes ka uurimusest [15], et  
mida pikemad on kontaktliinid, seda madalam on resonantssagedus. Koreas on raudtee elektri-  
liinidel *THD* piirväärtuseks seatud 1,5%. Uurimustöö [15] käigus modelleeriti *THD* hulka nii  
ühe- kui ka kaheerööpmelisel liinil ja võrreldi saadud tulemusi mõõdetud väärtustega. Joonistel  
4.7 ja 4.8 on toodud mõõdetud tulemused. Graafikutelt on näha, et *THD* väärtus ületab lubatud  
1,5%, seega osutub vajalikuks filtrite lisamine harmoonikute piiramiseks. Vaadeldes joonistel  
toodu *THD* hulka reaajas on näha, et lubatud piir ületatakse rongi kiirendamisel ja pidurda-  
misel [15]. Harmoonikute hulk osutub suuremaks mitmerööpmelisel raudteeliinil.





Joonis 4.7. Kiirraudtee liitumispunktis mõõdetud harmoonmoonutusteguri maksimaalsed- ja hetkväärtused ühe rongi korra [15]



Joonis 4.8. Kiirraudtee liitumispunktis mõõdetud harmoonmoonutusteguri maksimaalsed- ja hetkväärtused kahe rongi korral [15]

Uurimused [20] ja [21] vaatlevad harmoonikute hulka sõltuvana veolajaama paigaldatud trafotüübigi. Tulemusena on jõutud seisukohale, et näiteks *Scott-trafo* puhul on võimalik piirata 1-faasilise koormuse poolt kontakivõrku edastatud harmoonikute levimist. Harmoonikute piiramise määr sõltub nende järjekorrast ja koormuse suurusest [20]. Tabelis 4.1 kajastab harmoonikute levimist ülekandevõrku 1-faasilise ja *Scott-trafo* korral. Harmoonikute tase on mõõdetud primaarpoolel ning sekundaarpoole 1-faasilised koormused on võrdsed. Otsetoite korral on

faasi *C* voolu väärtus 0 ning harmooniline komponent jaguneb võrdselt faasi *A* ja *B* vahel. *Scott-trafo* korral jagatakse genereeritud harmoonikud kolme faasi vahel, seega on harmoonilise komponendi väärtus ühe faasi kohta väiksem. Vaadeldes harmoonikute komponente lähemalt, jaguneb 3-faasilise primaarpoole harmooniline voolukomponent omakorda sümmeetrilisteks komponentideks  $I_h^+$ ,  $I_h^-$  ja  $I_h^0$  (Tabel 4.2).

Tabel 4.1. Vooluharmoonikute amplituudväärtused suhtelistes ühikutes, mõõdetud *Scott* ja 1-faasilise trafo primaarpoolel [20]

H-ORDER	DIRECT			SCOTT		
	A	B	C	A	B	C
3	0.33	0.33	0	0.19	0.19	0.19
5	0.20	0.20	0	0.12	0.12	0.12
7	0.14	0.14	0	0.08	0.08	0.08
9	0.11	0.11	0	0.06	0.06	0.06
11	0.09	0.09	0	0.05	0.05	0.05
13	0.08	0.08	0	0.04	0.04	0.04

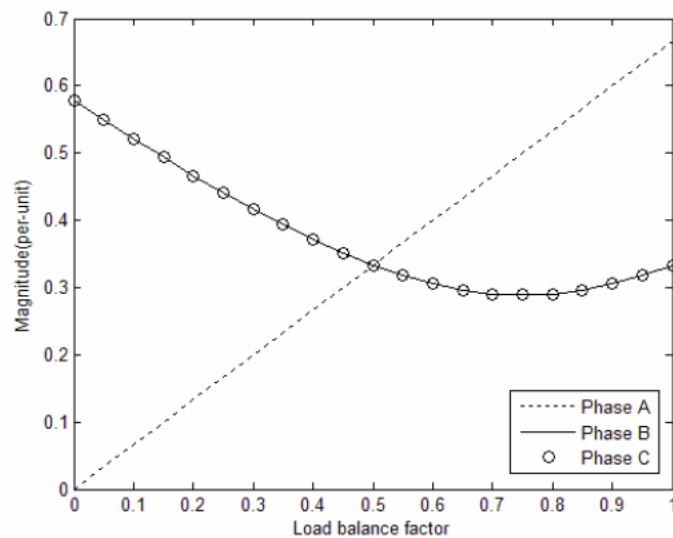
Tabel 4.2. Vooluharmoonikute sümmeetrilised komponendid suhtelistes ühikutes, mõõdetud *Scott* ja 1-faasilise trafo primaarpoolel [20]

H-ORDER	DIRECT CONNECTION			SCOTT CONNECTION		
	$I_h^+$	$I_h^-$	$I_h^0$	$I_h^+$	$I_h^-$	$I_h^0$
3	0.33	0.33	0	0	0.33	0
5	0.20	0.20	0	0.20	0	0
7	0.14	0.14	0	0	0.14	0
9	0.11	0.11	0	0.11	0	0
11	0.09	0.09	0	0	0.09	0
13	0.08	0.08	0	0.08	0	0

Tabelist 4.2 järeldub, et nii otsetoite kui ka *Scott-trafo* korral ei esine nulljärgnevuslikku harmoonilist komponenti. Ühtlasi elimineerib *Scott-trafo* mõnede harmoonikute puhul pärijärgnevuskomponendi (3,9,11) ja mõnede puhul vastujärgnevuskomponendi (5,9,13). Sellist sümmeetrilist olukorda esineb aga raudteeliini elektrivõrgus harva. Analüüsitud on ka eri faaside koormuste asümmeetria olukorda. Olukorra kirjeldamiseks võetakse kasutusele sümmeetriategur (*load balance factor*)  $k$  (4.4) [20], mis kirjeldab koormuste arvude suhet *Scott-trafo* *a* ja *b* poolel (sektsooni mõlemas faasis on koormus).

$$k = \frac{N_a}{N_a + N_b} \quad (4.4)$$

Otsetoite korral toidetakse nii  $a$  kui ka  $b$  poolt ühest ja samast kohast, seega teguri  $k$  väärtuse muutus ei mõjuta primaarpoole harmoonilise voolukomponendi väärtus. Joonisel 4.9 on toodud näitena kolmanda harmooniku väärtus *Scott-trafo* primaarpoolel sõltuvusena sümmeetriategurist  $k$ . Kui sümmeetriategur on 0 (kõiki ronge toidetakse  $b$  sektsioonist), siis ka  $I_{hA}$  on 0, kuid  $I_{hB}$  ja  $I_{hC}$  omavad maksimaalset väärtust. Sümmeetriateguri muutuse korral kasvab harmoonikute hulk faasis  $A$  vähendades samal ajal nende hulka faasides  $B$  ja  $C$  ning kui tegur omab väärtust 0,5 ehk kõik faasid on võrdselt koormatud, siis ka harmoonikute tase faasides saab võrdseks.



Joonis 4.9. Kolmanda vooluharmooniku amplituudväärtused mõõdetud *Scott-trafo* primaarpoolel [20]

Kokkuvõtvalt selgus uurimisest [20]:

- Kui koormused kolmes faasis on võrdsed, siis ka harmoonikute väärtused *Scott-trafo* primaarpoolel jagunenud faaside vahel võrdselt.
- Kui 1- faasilised koormused on võrdsed, siis *Scott-trafo* elimineerib täielikult 3,7 ja 11 harmooniku pärijärgnevuskomponendi ja 5,9 ning 13 harmooniku vastujärgnevuskomponendi.
- Paaritute harmoonikute maksimaalne ulatus *Scott-trafo* primaarpoolel ning asümmeetriategur käituvad sarnaselt.
- Maksimaalne harmoonikute ulatus väheneb kuni koormustasakaaluteguri kasvamiseni väärtusele 0,82. Maksimaalne elimineerimine 42,3% on asümmeetriateguri väärtusel 0,5.

- *Scott-trafo* ei võimenda harmoonikute päri- ja vastujärgnevuskomponenti, trafo kas vähendab nende taset või ei avalda neile üldse mõju.

Tabel 4.3 kajastab Hiina standardi (*GB/T14595-93 "Public electrical networking harmonic of Electrical energy Quality"*) järgi seatud harmoonilise voolukomponendi piirväärtuseid.

Tabel 4.3. Harmoonilise voolukomponendi piirväärtused [21]

Standard voltage (KV)					110
Datum short circuit capacity (MVA)					600
Harmonic current permissible value (A)	3h	4h	5h	6h	7h
	7.7	4.8	7.7	3.2	5.4

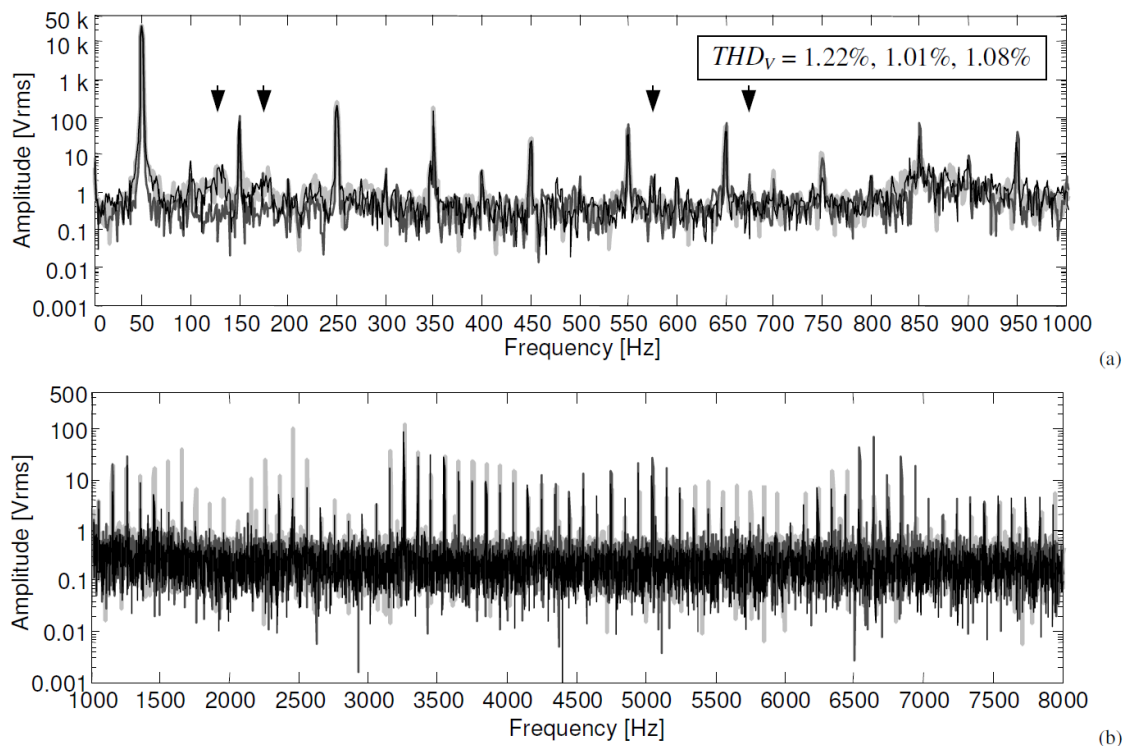
Tabelis 4.4 on toodud Hiina raudteeliinil mõõdetud tulemused ning nende võrdlust modelleerimisel saadutega. Tabeli andmetest võib järelda, et uurimustöö [21] käigus tehtud mudel on hinnangute tegemiseks piisavalt täpne.

Tabel 4.4. Reaalsete mõõtetulemuste ning simulatsiooni tulemuste võrdlus [21]

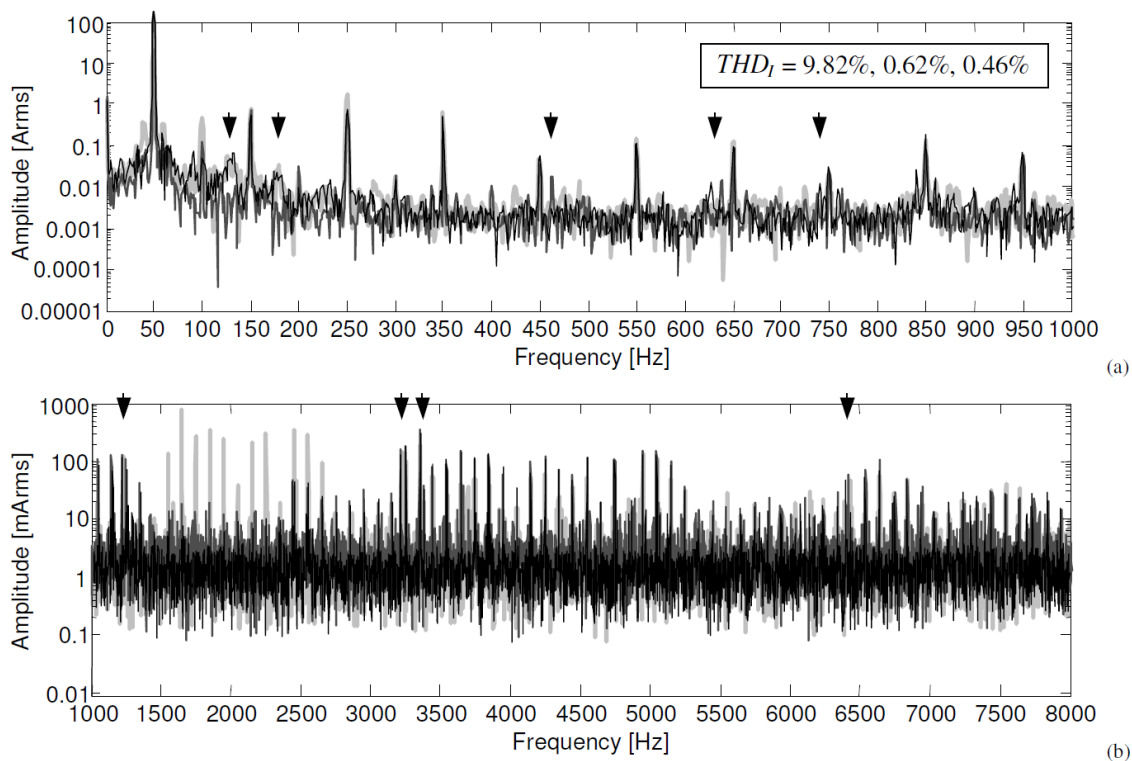
		Simulation(symmetrical load)		Test(symmetrical load)		simulation(asymmetrical load)		Test(asymmetrical load)	
Current (A)	$\alpha$	125		123		100.3		105	
	$\beta$	127.7		126		0		0	
THD (%)	phase	Voltage	Current	Voltage	Current	Voltage	Current	Voltage	Current
	A	1.73	21.05	2.0	21	0	0	0	0
	B	1.93	19.61	2.2	17	1.56	23.51	1.68	25.1
	C	2.51	23.15	2.9	23	1.58	23.51	1.69	25.2

Uurimuses [22] on vaatluse alla pantograafi voolu ja pinge lainekujud tiheda liiklusega raudteel Itaalias ja Prantsusmaal 2x25 kV, 50 Hz süsteemis. Pantograafi pinge ja voolu spektrid on toodud vastavalt joonisel 4.10 ja joonisel 4.11 (Itaalia) ning joonistel 4.12 ja 4.13 (Prantsusmaa).

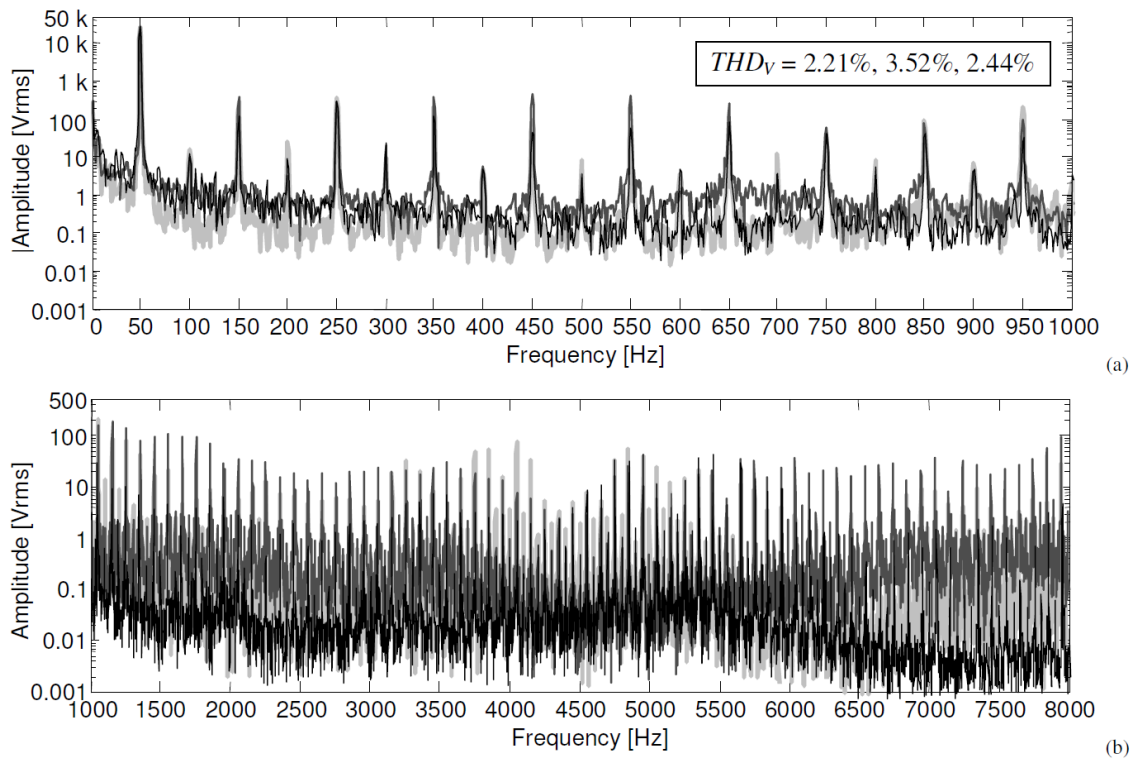
Itaalia võrgu puhul on pinge *THD* väiksem võrreldes Prantsusmaa võrguga. Pinge harmooniku häireks osutus uurimuse [23] põhjal 1-1,2% Itaalia võrgus ja 2,2-3,5% Prantsusmaa võrgus.



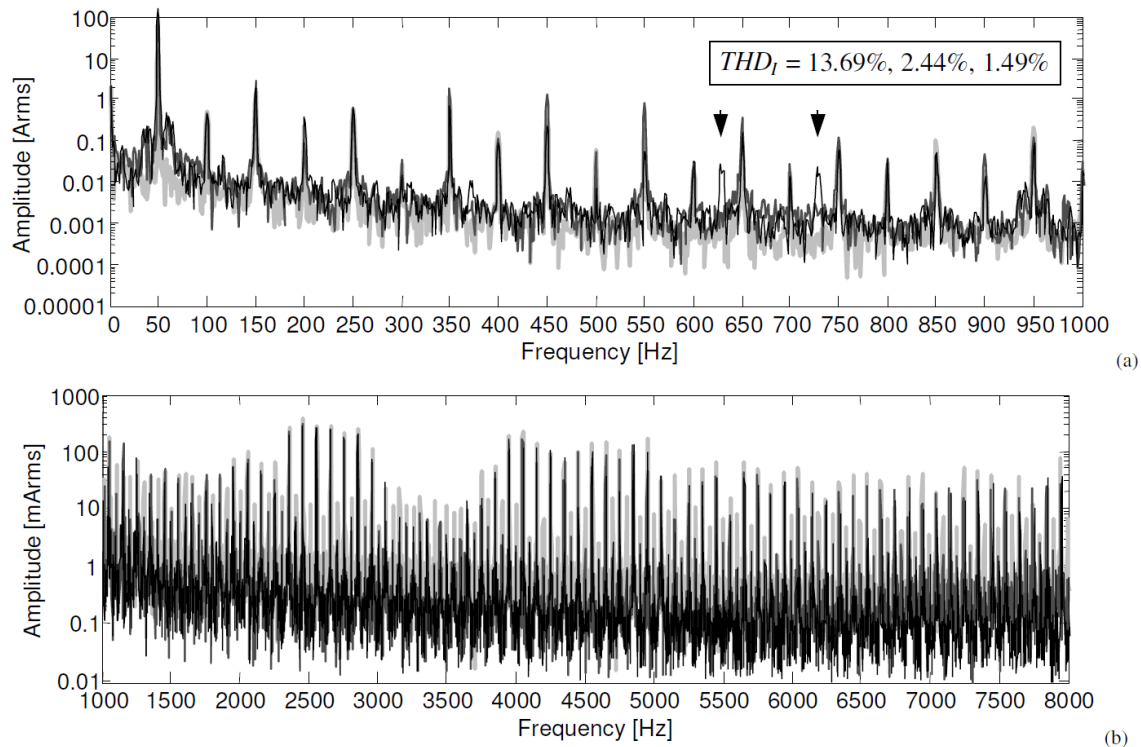
Joonis 4.10. Pantograafi pingespekter Itaalia juhtumil, kus graafikul a) on esitatud mõõdetav sagedusvahemik 0-1000 Hz ning graafikul b) 1-8 kHz [22]



Joonis 4.11. Pantograafi vooluspekter Itaalia juhtumil, kus graafikul a) on esitatud mõõdetav sagedusvahemik 0-1000 Hz ning graafikul b) 1-8 kHz [22]



Joonis 4.12. Pantograafi pingespekter Prantsusmaa juhtumil, kus graafikul a) on esitatud mõõdetav sagedusvahemik 0-1000Hz ning graafikul b) 1-8kHz [22]



Joonis 4.13. Pantograafi vooluspekter Prantsusmaa juhtumil, kus graafikul a) on esitatud mõõdetav sagedusvahemik 0-1000Hz ning graafikul b) 1-8kHz [22]

Enamik riike rakendab ülekandevõrgus harmooniliste moonutustele piirmäärasid. Näiteks Itaalias peab pingeline *THD* maksimaalne väärtus jääma 3-4% piiresse, mõningaid mööndusi tehakse lühiajaliselt (10 min) 132-150kV pingestmel.

Uurimuse [22] tulemustest selgub, et Itaalias on pingeline *THD* tase madalam, võrreldes Prantsusmaaga. Pingeline harmoonmoonutustase osutus uurimuse [22] põhjal 1-1,2% Itaalia võrgus ja 2,2-3,5% Prantsusmaa võrgus. Mõningaid andmeid kehtestatud piirmäärade kohta on leida kirjandusallikatest [23] ka näiteks Poola kohta, kus raudtee moderniseerimise projektis (1998 a) arvestati 110 kV pingestmel soovitavaks piirmääraks pingeline *THD*  $\alpha_{max}=2\%$  ja 6-30 kV pingestmel  $\alpha_{max}=5\%$ . Antud juhul lubati perioodilist piirväärtuse ületamist juhul kui selle kestvus jääb alla 10% 24 tunnist ja maksimaalne *THD* väärtus on madalam kui  $2 \cdot \alpha_{max}$ . Need piirmäärad on vastavuses ka *IEEE* standardiga, mis kehtestab pingestmel 69 – 161 kV *THD* piiriks 2,5% tavatingimustel, lühiajaliselt on lubatud selle ületamine 50% ulatuses [9]. Uurimustöö [19] käigus koostati mudel kahele modelleerimisülesandele, kus toide edastatakse läbi 1-faasilise trafo 25 kV sekundaarpingel kontaktliinile. Esimesel juhul on koormus alajaama sektsioonides asümmeetriline (Tabel 4.5), vastavalt 100 ja 200 A ning teisel juhul on tegemist sümmeetrilise (Tabel 4.6) koormusega 200 A.

Tabel 4.5. Simulatsiooni tulemused, asümmeetrilise koormuse korral [19]

Trafo tüüp	<i>THD</i> (%)	Pingeline asümmeetria (%)	Voolu asümmeetria (%)
1-faasiline	0,86	0,47	100
V-ühendusega	0,64	0,27	57,57
YNd11	0,68	0,27	57,09
Scott-trafo	0,61	0,15	32,83
Tasakaalustatud trafo	0,65	0,15	31,57
YNvd	0,67	0,15	32,85

Tabel 4.6. Simulatsiooni tulemused, sümmeetrilise koormuse korral [19]

Trafo tüüp	<i>THD</i> (%)	Pingeline asümmeetria (%)	Voolu asümmeetria (%)
1-faasiline	1,15	0,62	100
V-ühendusega	0,80	0,31	50
YNd11	0,73	0,31	50
Scott-trafo	0,68	0	0
Tasakaalustatud trafo	0,69	0	0
YNvd	0,68	0	0



Võrreldes tabelite 4.5 ja 4.6 *THD* andmeid selgub, et harmoonikute tase primaarpoolel on sarnane, seega pole rakendatav trafouhendus otsustavaks teguriks harmoonikute põhjustamisel ning sellest ei sõltu märkimisväärselt *THD* tase [19]. Lisas eelpool toodud näidetele on pingele *THD* taset analüüsitud ka India vealajaamades [24], kus on vaadeldud kahte 110/25 kV 1-faasilist trafot sisaldavat vealajaama. Tabelis 4.7 on toodud pingele lainekuju *THD* tase.

Tulemustest on näha, et *THD* väärtus alajaamas 2 on veidi üle standardiga kehtestatud piiri (2,5%; lühiajaliselt 3,75%). Alajaamas 1 jääb *THD* väärtus lubatavatesse piiridesse. Uurimuses [24] analüüsiti ka voolukuju moonutusi. Standardi *IEEE519* järgi põhinevad voolu moonutuse piirid süsteemi lühisvoolu tugevusel. Mida tugevam on süsteem, et toime tulla harmooniliste vooludega, seda kõrgemad on lubatavad piirmäärad. Alajaamade 1 ja 2 voolu *THD* tase on toodud tabelis 4.8.

Tabel 4.7. Pingele harmoonikud mõõdetud vealajaama trafodel 1 ja 2 [24]

Harmooniku järk	Väärtus alajaamas 1 %	Väärtus alajaamas 2 %
<b><i>THD</i></b>	<b>1,7</b>	<b>3,9</b>
2		0,041
3	0,745	1,217
4	0,011	0,051
5	0,944	1,463
6	0,021	0,041
7	0,781	1,322
8		0,83
9		0,873
10		1,277
11	0,737	1,837
12	0,03	0,011
14	0,041	2,036
15	0,315	0,01
19		1,356
25	0,528	

Tabel 4.8. Voolu harmoonikud mõõdetud veolajaama trafodel 1 ja 2 [24]

Harmooniku järk	Väärtus alajaamas 1 %	Väärtus alajaamas 2 %	IEEE piirmäär
<b>THD</b>	<b>26,1</b>	<b>15,8</b>	<b>14</b>
3	23,423	14,815	12
5	11,458	13,043	12
7	10,667	7,407	12
9	4,124	4,046	5,5
11	2,083	2,339	5,5
13	3,093	2,299	5,5
15	3,448	3,727	5
17	6,481	4,544	5
19	4,082	0,971	5

Tulemuses on näha, et alajaama 1 THD on 26,1%, mis on suuresti üle lubatava piiri. Alajaama 2 puhul ületab THD lubatavat väärtust vähesel määral. Kokkuvõtvalt on Indias antud süsteemis voolu harmoonikute tase nii summaarselt kui ka eraldi harmoonikute jätkude puhul üle lubatava piirväärtuse.

#### **4.4 Elektriraudtee regeneratiivse pidurdussüsteemi mõju ülekandevõrgule**

Elektriraudteesüsteemide puhul on oluliseks arutelu küsimuseks regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutamine, mis võimaldab oluliselt vähendada keskmist elektrirongide poolt tarbitud elektrienergiat [25]. Seejuures peab arvestama, et regeneratiivse pidurdamise korral on tegemist keeruka dünaamilise protsessiga, mille korral muutub lühikese perioodi jooksul elektrienergia-voo suund ja pinge väärtus. See tekitab elektrivõrkudes pinge efektiivväärtuste järske muutuseid ja keerukaid võnkeprotsesse ning võib mõjutada oluliselt elektrivõrgu stabiilsust, eriti mitme rongi samaaegsel pidurdamisel ühe toitealajaama piirkonnas [26], [27].

Regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutuselevõtt nõuab põhjalikku elektrisüsteemi analüüsi otsustamiseks, kas antud süsteemi on üldse Eesti elektrisüsteemis võimalik rakendada. Antud talitlusrežiimi rakendamisel tuleb määrata konkreetsed kasutustingimused. Näiteks Inglismaa elektriraudteesüsteemis on keelatud regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutamisel elektrienergiat elektrivõrku tagastada, mille tõttu kasutatakse vedurites regeneratiivset pidurdamist läbi koormustakistuste. Prantsusmaal on regeneratiivne pidurdamine üldtingimustel lubatud. Konkreetse rongi regeneratiivse talitluse üle otsustab elektriraudtee releesüsteem, kas pidurdamisel antakse energiat elektrivõrku või muundatakse pidurdustakistustel soojuseks [25].

Tulenevalt regeneratiivse talitluse negatiivsetest mõjudest elektrisüsteemidele, uuritakse maailmas erinevaid energia salvestamise võimalusi veduritel ning salvestatud energia kasutamist, kas rongide abiahelate toiteks või kiirendamisel kontaktvõrgu koormuse vähendamiseks [28].

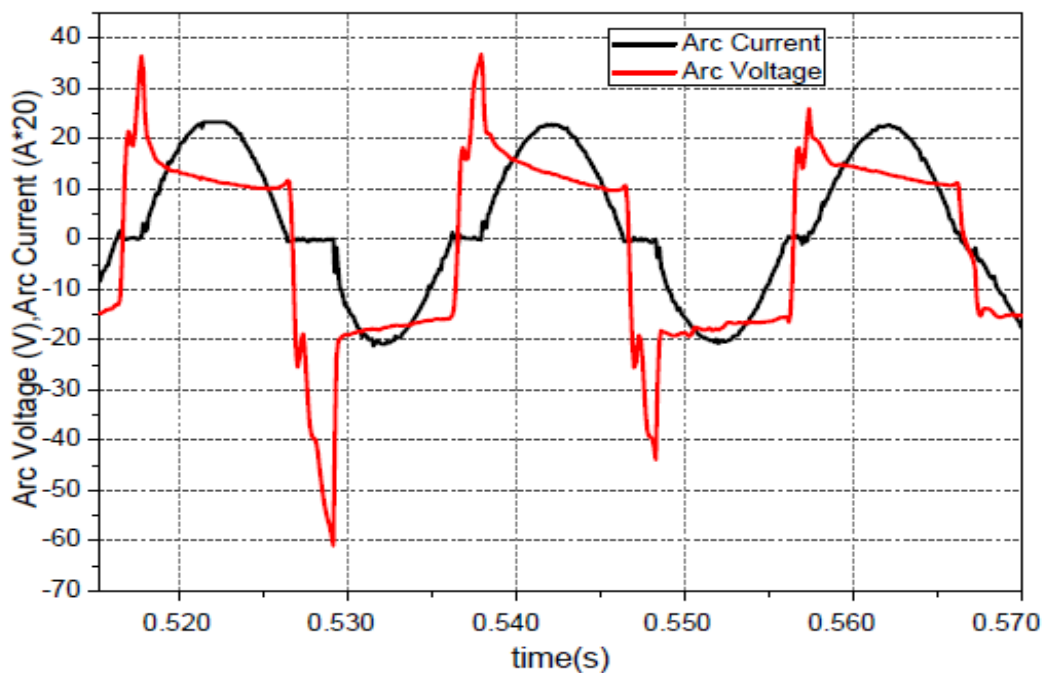
Käesolevas aruandes ei ole seda teemat teema keerukuse tõttu täpsemalt analüüsitud. Võimalik oleks seda uurida projekti kolmandas etapis.

#### ***4.5 Ebaühtlane kontakt pantograafi ja kontaktliini vahel***

Selleks, et saavutada hea kontakt veduri pantograafi ja kontaktliini vahel, kasutatakse elektriraudtee kontaktvõrgus laialdaselt mehaanilisi automaatpinguteid, mis tagavad tugijuhtme konstantse mehaanilise pinge ning kontaktjuhme rippe puudumise. Kaarleegi vältimiseks kasutatakse tänapäeval ka pantograafide aktiivjuhtimist elektrimootoritega tagamaks pantograafi pideva ja konstantse surve vastu kontaktliini [25], [29].

Iga väiksema kontakti kadumine põhjustab pantograafi ja kontaktvõrgu vahelist kaarleeki, mis kahjustab mõlemat kontaktpinda. Täiendavad kahjustused suurendavad veelgi kaarleegi tekkevõimalust [29].

Tulenevalt vedurite suurest ühikvõimsusest, põhjustab veduri pantograafi ja kontaktvõrgu vahelise ühenduse katkemine lühiajalise koormuskatkestuse ning kaarleegi tekkimisel ebaliineaarse koormusvoolu. Ebaliineaarne koormusvool toob endaga kaasa täiendavate harmoonikute tekkimise elektrivõrgus ja olulisi pingekvaliteedi probleeme. Peamiselt tajutakse kaarleegist tingitud koormusekõikumist ning kaarleegi aegset ebaliineaarsest koormusvoolust tingitud pingekõikumist värelusena (lampide vilkumisena).



Joonis 4.14. Pinge ja koormusvoolu kuju kaarleegi poolt tekitatud häiringu korral [29]

Joonisel 4.14 on kujutatud kaarleegi mõju kontaktvõrgu pingele ja veduri koormusvoolule. Jooniselt on näha, et kaarleek moonutab pinge kuju, mis on tingitud kaarleegi ebalineaarsest takistusest [29].

Kontaktliini ja pantograafi halva ühenduse korral (kui puudub täielik kontakt või pantograaf ei avalda kontaktliinile piisavad vastusurvet) tekib ühenduskohas sädelus, mis põhjustab olulisi elektromagnetühildavuse probleeme. See võib põhjustada häiringuid elektriraudtee läheduses asuvates sidevõrkudes (mis ei kasuta fiiberoptilisi liine) ning teatud tingimustel võivad sädelusest tingitud häiringud levida ka raadioside sagedusalasse. Täpsemalt on elektromagnetilise ühildavuse probleeme, mis on põhjustatud halvast kontaktist pantograafi ja kontaktliini vahel, kirjeldatud artiklis [30].

#### 4.6 Kokkuvõte

Kasutatav kontaktvõrgu süsteem ja selle konfiguratsioon avaldab olulist mõju elektrisüsteemile. Antud peatükis analüüsiti suuremaid kontaktvõrgus tekkivaid probleeme ja nende mõju süsteemile ning elektri kvaliteedile. Rongide puhul on tegemist 1-faasiliste tarbijatega ja sellest tulenevalt on suurimaks probleemiks süsteemis tekkiv pinge asümmeetria, mis põhjustab elektrivõrgus püsitalitlusprobleeme, vähendab võrgu ülekandevõimet ja avaldab negatiivset mõju

tundlikele tarbijatele. Tekkiv pinge asümmeetria sõltub võrguosa tugevusest ja veduri võimsusest. Seega on pinge asümmeetria hindamiseks ja selle mõju analüüsimiseks oluline teada kui tugevasse ja stabiilsesse elektrivõrgu piirkonda veojõusüsteem ühendatakse.

Elektri kvaliteedi seisukohalt vajavad märkimist ka kontaktliinide vahendusel võrku levivad harmoonikud, mille allikateks on enamasti vedurid, kasutust leidvad ajamid, katkematud toiteallikad ja jõuelektroonika muundurid. Harmoonikud põhjustavad moonutusi pinge ja voolu siinuselises lainekujus ning omavad seetõttu mõju võimsuse edastusele kontaktliinis. Samaaegselt võimaliku resonantssageduste ja harmooniku sageduse kokkulangemisele võimenduvad lainekuju moonutused veelgi. Peamisteks tagajärjedeks on elektromagnetilised häiringud, soojuskaod trafodes ja õhuliinides, ülekuumenemine ning võimalikud liigpinged ja –voolud aga ka valeoperatsioonid kaitseseadmetes ja vibratsioonid jõukondensaatorites. Elektriraudteeliini planeerimisel on olulisel kohal võrgus levivate harmoonikute taseme hindamine ja selle analüüs vastavalt kehtestatud piirväärtusele. Harmoonikute hulk osutub suuremaks mitmerööpmelisel raudteeliinil. Mitmete uurimuste tulemusena on selgunud, et veoalajaama paigaldatud trafotüüp pole otsustavaks teguriks harmoonikute põhjustamisel, kui samas on täheldatud juhtumeid kus *Scott-trafo* rakendamisel on võimalik teataval määral piirata kontaktvõrku edastatud harmoonikute levimist.

Veduritel regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutamine tekitab elektriraudteesüsteemides teatavaid probleeme ja selle kasutamise lubamine on põhjustab tõsist arutelu, kuna tegemist on dünaamilise protsessiga, mis avaldab mõju elektrivõrgu stabiilsusele. Sellest tulenevalt on regeneratiivse pidurdussüsteemi rakendamisel tarvis määrata konkreetsed kasutustingimused.

Tulenevalt kasutatavast õhuliinisüsteemist esineb kontaktvõrgus ka konstruktsioonilisi probleeme, milles märkimisväärseim on võimaliku ebaühtlase kontakti tekkimine õhuliini ja pantograafi vahel. Katkestusteta veoenergia tagamiseks on oluline püsiv ja kvaliteetne vastastikune ühendus. Nõrk ühendus ja katkestused liini ja pantograafi vahel toovad kaasa sädeluse ja elektrikaare tekke, mis põhjustavad detailide vananemist ja mehaanilist stressi seadmetele. Lisaks põhjustab kontaktliini ja pantograafi ühenduse katkemine lühiajalise koormuskatkestuse ja ebalinearse koormusvoolu, mille tagajärjeks on täiendavate harmoonikute tekkimine.

## 4.7 Kirjandus

- [1] Luo, A., Wu, C., Shen, J., Shuai, Z., Ma, F. Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.26, No.10, October 2011, pp. 2844-2856.
- [2] Wang, H., Tian, Y., Gui, Q. Evaluation of negative sequence current injecting into the public grid from different traction substation in electrical railways. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1, CIREN 2009, Prague, Czech Republic, 8-11 June 2009, pp. 1-4.
- [3] Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Schneider, E. Contact Lines for Electric Railways. Erlangen, Publicis Publishing, 2009/2012, 994 pp.
- [4] Ho, T. K., Chi, Y. L., Wang, J., Leung, K. K., Siu, L. K., Tse, C. T. Probabilistic load flow in AC electrified railways. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol. 152. No. 4, July 2005, pp. 1003-1013.
- [5] Hanmin, L., Sehchan O., Gildong K., Cheonheon, A. A Study on the Equivalent Conductor Representation of AC Electric Railway System. International Conference on Information and Multimedia Technology, ICIMT 2009, Jeju Island, 16-18 December 2009, pp. 33-37.
- [6] Dolara, A., Gualdoni, M., Leva, S. Effect of primary High Voltage supply lines on the High Speed AC Railways Systems. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2010, Bergamo, 26-29 September 2010, pp. 1-8.
- [7] Dong, A., Wu, G., Gao, G., Zhou, L., Wangr, W., Wang, B., Cui, Y., Mingming, Y. Simulation system of pantograph arcing. 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology, ICEPE-ST 2011, Xi'an, 23-27 October 2011, pp. 637-641.
- [8] Jimenez-Octavio, J. R., Sanchez-Rebello, C., Carnicero, A. The Dependence on Mechanical Design in Railway Electrification. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 1, No. 1, September 2013, pp 4-10.
- [9] Heine, P., Hyvärinen, M., Niskanen, J., Oikarinen, A., Renner, H., Lehtonen, M. The Impact of 50 Hz Railroad Systems on Utility System Power Quality. Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ) Conf. Kuressaare, 16-18 June 2010, pp. 61-66.
- [10] Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks, Euroopa Standard EN 50160:2010, July 2010.

- [11] Golovanov, N., Roscia, M., Zaninelli, D. Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power Systems Supplying High Speed Railway. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3, June 2005, pp. 2509-2514.
- [12] Kneschke, T. A. Control of Utility System Unbalance Caused by Single-Phase Electric Traction. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 6, November 1985, pp. 1559-1570.
- [13] Lee, H., Kim, G., Lee, C., Oh, S., Park, S. Analysis of Voltage Unbalance on Korean Railway System.
- [14] Gunavardhini, N., Chandrasekaran, M., Sharmeela, C., Manohar, K. A Case Study on Power Quality Issues in the Indian Railway Traction Sub-Station. 7th International Conference on Intelligent Systems and Control, ISCO 2013, Coimbatore, Tamil Nadu, India, 4-5 January 2013, pp. 7-12.
- [15] Lee, H., Lee, C., Jang, G., Kwon, S. Harmonic Analysis of the Korean High-Speed Railway Using the Eight-Port Representation Model. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, April 2006, pp. 979-986.
- [16] Dolara, A., Gualdoni, M., Leva, S. Effect of primary High Voltage supply lines on the High Speed AC Railways Systems. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2010, Bergamo, 26-29 September 2010, pp. 1-8.
- [17] Ye, Z., Lo, E., Yuen, K. H., Pong, M. H. Probabilistic Characterization of Current Harmonics of Electrical Traction Power Supply System by Analytic Method. 25th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, IECON'99 Proceedings, San Jose, Vol. 1, pp. 360-366, November 1999.
- [18] Yuen, K. H., Pong, M. H., Lo, W. C., Ye, Z. M. Modeling of Electric Railway Vehicle for Harmonic Analysis of Traction Power-supply System using Spline Interpolation in Frequency Domain. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '99, Dallas, TX, 14-18 March 1999, Vol.1, pp. 458-463.
- [19] Hang, L., Qunzhan, L., Frenghua, G. Traction Power System Model and Simulation for Estimation and Forecast of Traction Load. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Chengdu, 28-31 March 2010, pp. 1-4.
- [20] Mazin, H.E., Xu, W. An Investigation on the Effectiveness of Scott Transformer on Harmonic Reduction. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburg, PA, 20-24 July 2008, pp. 1-4.

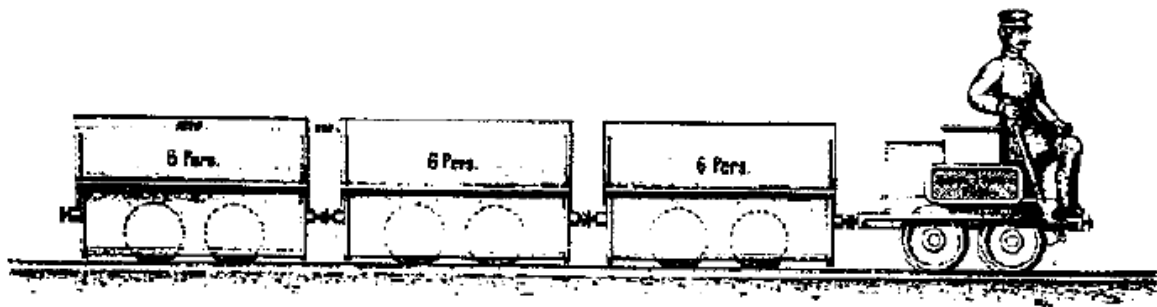
- [21] Ming-li, D., Guang-ning, W., Xueyuan, Z., Chun-Lei, F., Chang-hong, H., Qiang, Y. The simulation analysis of harmonics and Negative sequence with Scott wiring transformer. 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, 21-24 April 2008, pp. 513-516.
- [22] Mariscotti, A. Results on the Power Quality of French and Italian 2x25 kV 50 Hz railways. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Graz, 13-16 May 2012, pp. 1400-1405.
- [23] Capasso, A. The power quality concern in railway electrification studies. 8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings, Athens, 14-18 October 1998, Vol. 2, pp. 647-652.
- [24] Gunavardhini, N., Chandrasekaran, M., Sharmeela, C., Manohar, K. A Case Study on Power Quality Issues in the Indian Railway Traction Sub-Station. 7th International Conference on Intelligent Systems and Control, ISCO 2013, Coimbatore, Tamil Nadu, India, 4-5 January 2013, pp. 7-12.
- [25] B. A. Ross, A Survey of Western European AC Electrified Railway Supply Substation and Catenary System Techniques and Standards, IEEE Transactions on Industry and General Applications, Oct. 1971.
- [26] Goodman, C. J. Overview of Electric Railway Systems and The Calculation of Train Performance, IET Professional development Course on Electric Traction System, pp. 1-24, 2010.
- [27] Tulbure, R. B. M. Models for the AC Locomotives Regenerative Braking, IEEE International Conference on Automation Quality and Testing Robotics (AQTR), 2012, 525-530 pp.
- [28] Ibaiondo, H.; Romo, A., "Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid," Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International, vol., no., pp.T9-94,T9-97, 6-8 Sept. 2010
- [29] Dong, G. Simulation System of Pantograph Arcing, 1st International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology, 2011, 637-641 pp.
- [30] Song, S. F. C. Three Types of Electromagnetic Noise between Pantograph and Catenary, 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2009, 40-43 pp.



## 5. Elektriraudtee vedurid

Raudteel kasutusel olevatel veduritüüpidel ja nendes rakendatavatel tehnoloogiatel on kandev roll nii elektriraudteesüsteemi sisestele mõjudele ja nende ulatusele kui ka nende kandumisele kogu ülejäänud elektrivõrku. Sellest tulenevalt osutub vajalikuks analüüsida erinevaid veduritüüpe ja nende karakteristikuid, millele keskenduvad antud aruande peatükid 5.1 ja 5.2. Peatükis 5.3 käsitletakse aga vedurite matemaatilist modelleerimist.

Esimestele elektrijameid kasutavate vedurite väljatöötamisele andsid tõuke elektrimootorite ning ajamite tootjad 19. sajandi lõpus, kuna soovisid leida oma toodetele uusi rakendusi ja laiendada turgu. Esimest elektriraudtee näidist esitleti 1879. aastal Berliinis, mis oli 300 meetrit pikk ja selle rong (Joonis 5.1) oli mõeldud 18 reisija jaoks. Rongi maksimaalkiiruseks täiskoor-musel on 7 km/h.



*Joonis 5.1. Esimene elektriraudtee katserong, Berliin 1879 a [1].*

Esimese elektrirongi näidis tõestas, et tehnoloogiliselt on võimalik elektrit kasutada raudtee vedurite käitamiseks ning see andis tõuke elektriraudtee arengule ja raudteevõrkude elektrifitseerimisele. Elektriraudtee arengut kiirendas omakorda Esimene maailmasõda, kuna kivisöe puuduse tõttu tekkis nõudlus uudsete lahenduste kasutusele võtmiseks, et leida alternatiive kütusele ja auruvedurile [1].

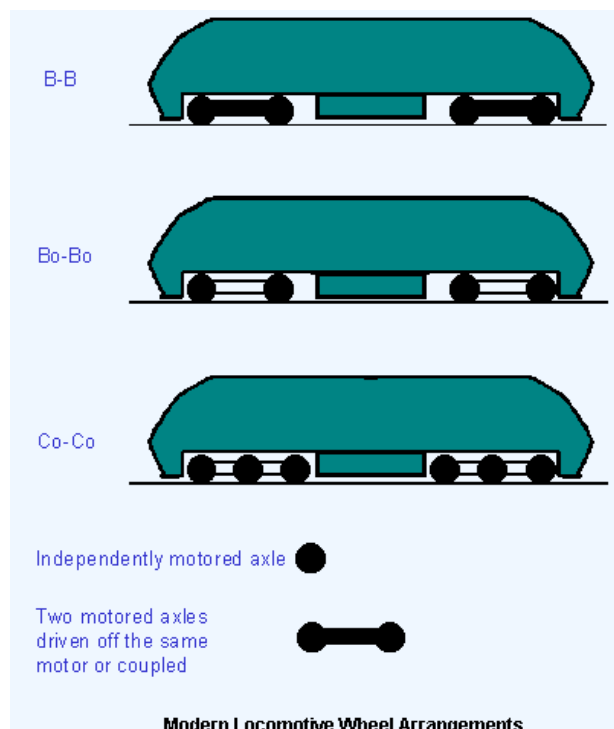
### 5.1 Vedurite tüübid

Üldistatult jagunevad raudteesüsteemides kasutatavad vedurid kolmeks: reisirongi-, kaubarongi- ja universaalvedurid. Lisaks vedurite sihtotstarbele jaotatakse need omakorda alaliikideks maksimaalse kiiruse ning veojõu järgi. Näiteks peab standardne kaubarong olema suuteline vedama kui 6000 tonnist veost (ehk sadat standardset 60 tonnist vagunit) [2]. Manöövervedurite ning väikeste kaubarongide veose kaal on kuni 2000 tonni [1]. Kaubarongide maksimaalkiirus jääb tavaliselt vahemikku 100-120 km/h [2], [3]. Tüüpilise reisirong veokoormuseks on keskmiselt kuni 500 tonni [1], seejuures on tüüpiliseks maksimaalkiiruse vahemikus 180-

200 km/h [4]. Reisirongi üheks alaliigiks on veel kiirrong, mis saavutab kiirust rohkem kui 200 km/h [5]. Hetkel on kiiremaiks kasutusel olevaks rongiks TGV tüüpi rong, mille maksimaalkiiruseks on 350 km/h [6].

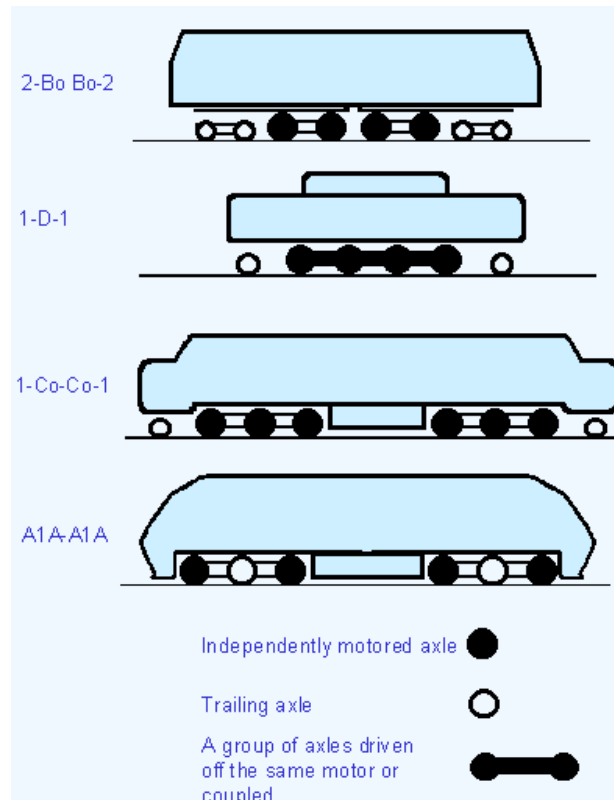
Universaalvedureid kasutatakse nii kauba kui ka reisirongide vedamisel, kuna vedurite maksimaalne kiirus on sobiv täitmaks reisirongide kiiruse vajadusi ning nende veojõud on piisav vedamiseks ka väiksema koosseisuga kaubarongi. Universaalvedureid kasutatakse tavaliselt olukordades, kus peatuste vahelised vahemaad ei ole suured ning puudub vajadus suure veojõu järele.

Vedurite ajamite keerukus on otseselt seotud vedurite klassifikatsioonist tulenevalt selle vedavatest sildadest. Klassifikatsioon annab olulist informatsiooni veduril kasutatava veojõusüsteemi keerukusest ja tegelikust kasutusotstarbest. Joonisel 5.2 on toodud kaasaegsete vedurite vedavate sildade klassifikatsioonid, kus tähekombinatsioon näitab veduril sildade konfiguratsiooni ning igas raamis asuvad sillad on eraldatud „-“ märgiga. Tähekombinatsioonis esinev suur täht viitab ühes raamis paiknevate sildade arvule vastavalt selle järjekorranumbrile tähestikus. Kombinatsioonis esinev väike täht „o“ lisatakse juhul, kui sillal on olemas oma ajam. Kuna tänapäevaselt arenenud materjalid võimaldavad kasutada ainult vedavaid sildu, siis puudub vajadus täiendavateks mittevedavateks sildadeks [7].



Joonis 5.2. Kaasaegsete vedurite rataste asetuse [7]

Vanematel veduritel on kasutusel ka mittevedavad sillad, mistõttu nende klassifiktsioonis esinevad ka numbrid, mis viitavad mittevedavate sildade arvule (Joonis 5.3) [7].



Joonis 5.3. Varasemate vedurite rataste asetus [7]

Joonisel 5.3 esitatud märgistus on kõige laialdasemalt levinud, kuid esineb ka märgistusi kus raamide eraldamiseks kasutatakse märgi „-“ asemel ka „“ või „+“.

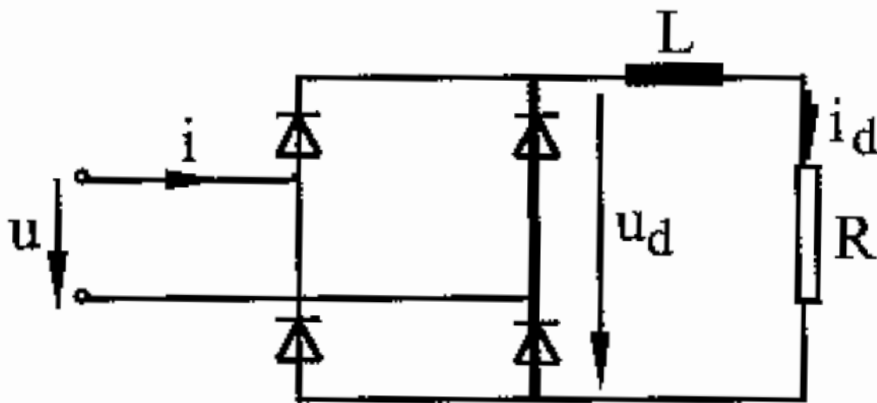
Elektriraudteedel kasutatavate vedurite klassifitseerimisel on oluliseks karakteristikuks ka ajamis kasutatav tehnoloogia. Kasutusel on nii alalisvoolu (DC) kui ka vahelduvvoolu (AC) ajameid, mille valik põhineb tootja ja tellija vahelisest kokkuleppest. Valdavalt eelistatakse DC ajameid, kuna need on paremini juhitavad ning sobivad elektriraudteedel kasutamiseks. AC toitega kontaktvõrkude korral kasutatakse vedurites alaldi ning DC ajami kombinatsiooni. Vedurite ajamite ja mootorite tehniliste parameetrite kohta puudub valdavalt avalikkusele kättesaadav informatsioon, kuna see on tootja ärisaladus [1].

Kontaktvõrk ja veduri ajam moodustavad ühtse terviku, mille lahendust eristatakse kombinatsioonidega AC, AC-DC, DC-DC, DC-AC, kus esimene tähekombinatsioon viitab kontaktvõrgu ja teine veduri ajami voolusüsteemile. Joonis 5.4 annab ülevaate kontaktvõrgu ja veduri süsteemide põhimõtteskeemidest [1].



### 5.1.2 Dioodalaldid

Elektriraudtee vedurite ajamite teine põlvkond põhines dioodalalditel, mis võimaldasid toita vedurit AC kontaktvõrgust ning rakendada veduritel DC süsteemi. Viimane muutis veduri ehituselt oluliselt lihtsamaks. Juhtimine toimus toitetrafo pingestme muutmisega, kuna dioodalaldiga polnud alalisvoolupinge reguleerimine võimalik. Takistite asemel hakati nüüd kasutama dioodalaldit, mis ühendati kontaktvõrgu süsteemipingele läbi reguleeritava trafo [1]. Diodaalaldi põhimõtteskeemi kajastab joonis 5.5.

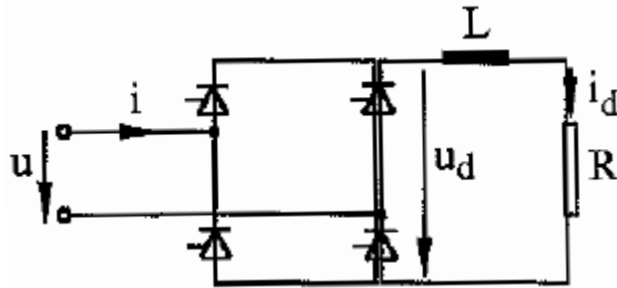


Joonis 5.5. Diodaalaldi põhimõtteskeem [1]

Diodaalaldi tagas rongi parameetrite olulisemalt ökonoomsema reguleerimise võrreldes takistustel põhineva ajamiga. Tänu oma lihtsale ehitusele leiab dioodalaldil põhinev ajamitüüp rakendust ka tänapäeval [1].

### 5.1.3 Türistor inverterid

Elektriraudtee vedurite ajamite kolmas põlvkond põhineb türistor inverteritel. Inverterite kasutamine võimaldab rakendada veosüsteemis kolmefaasilisi asünkroonmootoreid. Inverteri ning asünkroonmootori kombinatsioon tagab täpsema veduri veosüsteemi reguleerimise. Lisaks osutus nüüd võimalikuks ka digitaalsete abifunktsioonide, näiteks veojõukontrolli rakendamine [1]. Diodaalaldi põhipuuduseks oli pingereguleerimise võimaluse puudumine ning seda tuli teha mehaaniliselt muutes trafo pingestmeid, mis tõid kaasa täiendavad kulud trafode hooldamisel. Diodid sai nüüd asendada türistoridega. Türistor inverteeri põhimõtteskeem on toodud joonisel 5.6.

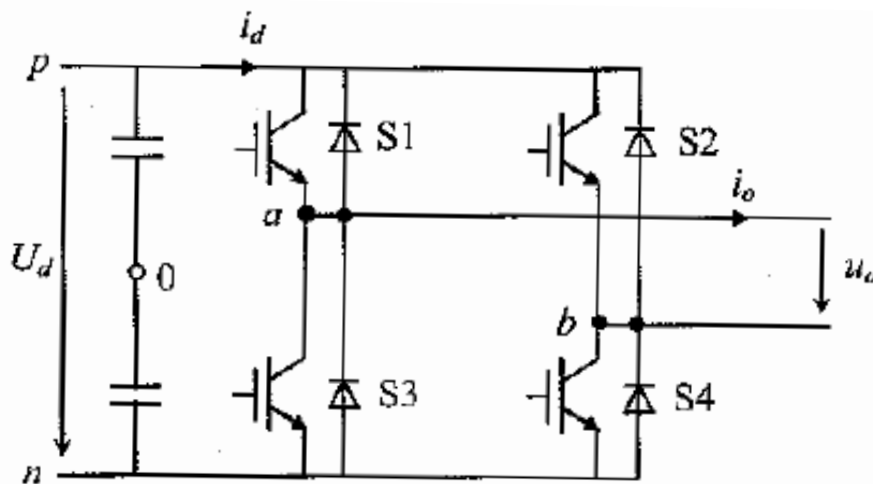


Joonis 5.6. Türistor inverteri põhimõtteskeem [1]

Tänapäeval kasutatakse elektriraudtee vedurite inverterites enamasti GTO (*Gate Turn Off*) tüüpi türistore, kus vooluimpulsiga on võimalik türistor sulgeda soovitud ajahetkel. Türistor inverteri kasutamine võimaldab mootori pöördemomendi sujuvat reguleerimist, mis omakorda muudab veduri efektiivsemaks, kuna võimaldab saadaoleva veojõu maksimaalset rakendamist. Türistor inverteerite skeemid koostatakse vastavalt sellele, et oleks võimalik rakendada ka regeneratiivset pidurdamist. Türistor inverteri peamiseks puuduseks on selle madal võimsustegur ja tarbitava voolu tugev moonutus [1].

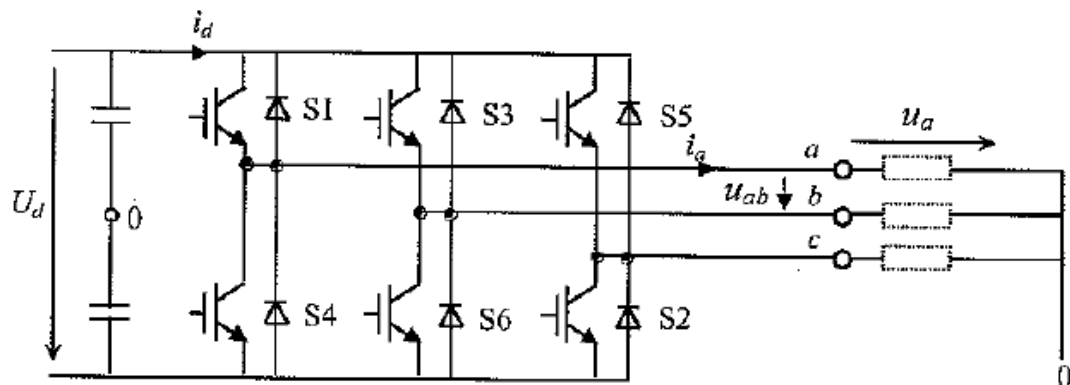
#### 5.1.4 Transistor inverter

Kõige uuema põlvkonna elektriraudtee veosüsteemidest moodustavad transistor inverteritel põhinevad veosüsteemid. Oma olemuselt on tegemist türistor inverteritel põhineva veosüsteemi edasiarendusega, kus türistoride asemel kasutatakse valdavalt IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) transistore. Ühefaasilise transistor inverteri põhimõtteskeem on toodud joonisel 5.7.



Joonis 5.7. Ühefaasilise transistor inverteri põhimõtteskeem [1]

IGBT transistorid omavad olulisi eeliseid, võrreldes GTO türistoridega. Esiteks on suudad IGBT transistor välja lülitada kõrge efektiivväärtusega voolusid ( $> 1000 \text{ A}$ ). Tänu antud omadusele osutub vähema transistoride arvu juures luua samaväärne inverter, mistõttu viimane on tunduvalt kompaktsem ja vajab vähem jahutamist. Lisaks on IGBT transistoril võimalik 3-4 korda kiiremini lülitada võrreldes GTO türistoridega, mis vähendab võimalikke moonutusi voolu lainekujus ning vähendab veduri poolt tekitatud harmoonikuid kontaktvõrgus [8]. Kolmefaasilise türistor inverteri põhimõtteskeem on toodud joonisel 5.8.



Joonis 5.8. Kolmefaasilise transistor inverteri põhimõtteskeem [1]

## 5.2 Vedurite karakteristikud

Elektriraudtee veduri elektrienergia tarbimine sõltub peamiselt rongi massist, liikumise kiirusest ja kiirendusest. Vedurid projekteeritakse vastavalt veduriklassile ettenähtud nimimassile ja -kiirusele, mille juures saavutatakse veduri maksimaalne kasutegur. Normaalingimuste juures on veduri energiatarve minimaalne püsikiirusel ja maksimaalne kiirendamisel. Energiatarvet mõjutab ka raudteeliini trass, näiteks selle kurvide raadiused ning kõrguste vahed (tõusud ja langused). Mõju energia tarbimisele omab ka tuulekiirus ja -suund ning rongi välispind ja selle aerodünaamilised omadused.

Rongi ajamite võimekust iseloomustavad rongi kiirenduskarakteristikud. Kiirendamisel viiakse veduri ajami veojõud maksimumini. Veduri maksimaalse kiirenduse määravad ära ajami ja mootori tehnilised piirangud ning raudteerööbaste ja veduri vedavate rataste vahel tekivad hõõrdejõud. Sellest tulenevalt ei ole rataste pöördekiiruse järsk suurendamine võrdeline rongi kiiruse samaväärse kasvamisega. Liigne pöördekiiruse järsk suurendamine võib kaasa tuua hoopis rongi aeglustumise, kuna rattad kaotavad haarde rööbastega. Lubatud maksimaalse kiirenduse piirang normaalingimustel tuleb peamiselt reisijatele mugavuse tagamisest ja kaubarongide

puhul kauba käitlemise nõuetest, jäädes enamasti vahemikku 1-1,5 m/s<sup>2</sup> [1]. Rongide kiirenduskarakteristikud esitatakse vastavalt veduri tüüpile tavaliselt graafilisel kujul, mis kajastab veojõu sõltuvust kiirendusest. Kuna veduri elektrivõimsus  $P_{el}$  (5.1) sõltub veojõust  $F$  ja kasutegurist  $\eta$ , siis ei kasutata võimsuse sõltuvust kiirusest.

$$P_{el} = \frac{P}{\eta} = \frac{F \cdot v}{\eta} \quad (5.1)$$

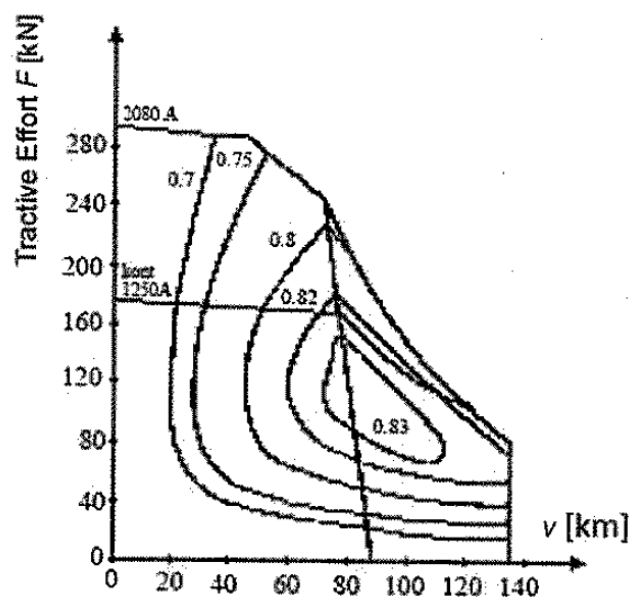
kus  $P$  – veduri mehaaniline võimsus W,

$v$  – veduri kiirus km/h.

Erinevalt diiselledurist on elektrivedurit lubatud lühiajaliselt üle koormata, seega annab kiirenduskarakteristikutel sõltuvuse kasutamine veojõust täpsema informatsiooni. Elektrivedurite puhul eristatakse kahte koormuse põhiliiki: maksimaalse jõumomendiga ja pideva veojõuga sõit.

Joonisel 5.9 on toodud Rootsi Rc5 veduri veojõu ja kasuteguri karakteristik [3], [9], millelt võib lugeda, et madalate kiiruste juures (kuni 50 km/h) püsiva veojõuga sõidu korral rakendatakse veojõudu väärtusega 175 kN. Samal kiirusel maksimaalse jõumomendi režiimil rakendatakse aga 65% suuremat veojõudu 290 kN. Saavutades poole maksimaalkiirusest väheneb ka rakendatav veojõud 50%-ni. Suuremate kiiruste korral puudub erinevus rakendatavas veojõu väärtuses tulenevalt veorežiimist. Reisi- ja kaubarongide karakteristikud erinevad teineteisest.

Vedurite voolugraafikud näitavad tarbitava voolu ning rongi kiiruse vahelist seost ning nendega saab täpsemalt tutvuda näiteks allikatest [3] ja [9].

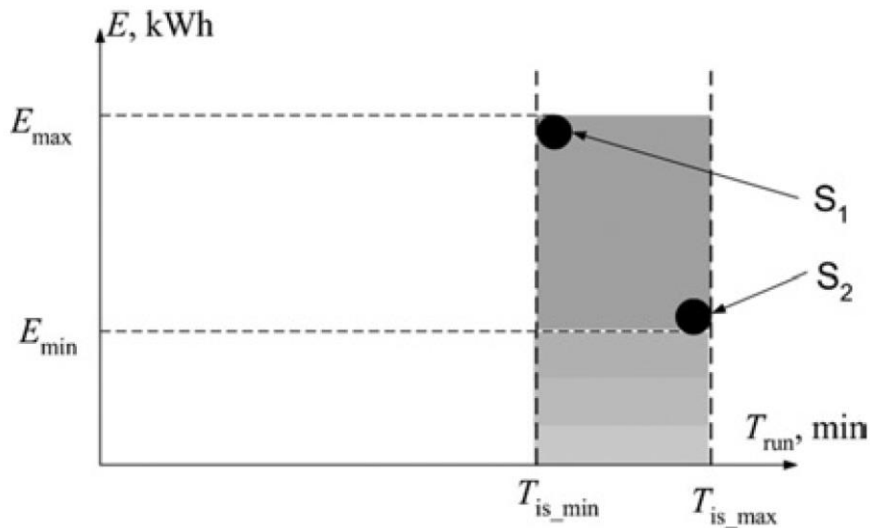


Joonis 5.9. Rootsi Rc5 veduri veojõu ning kasuteguri karakteristik [1]



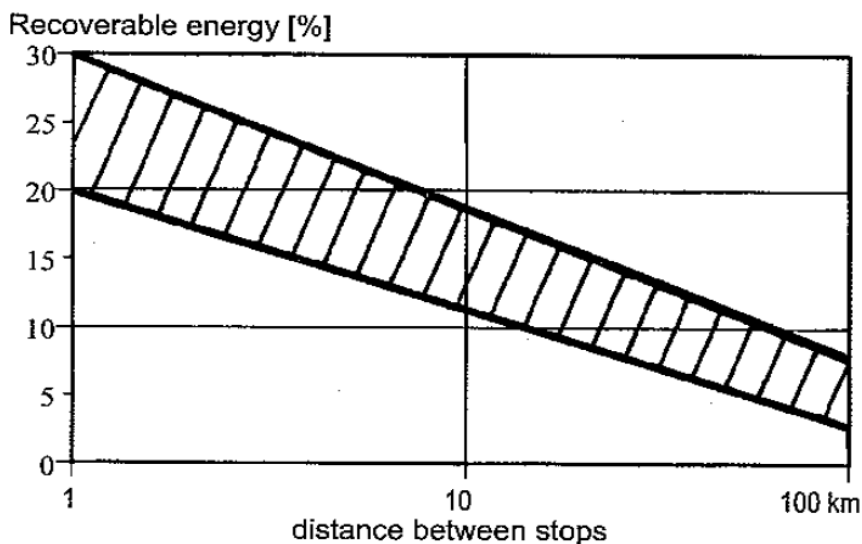


Olukorra näitlikuks kirjeldamiseks on toodud joonis 5.12, mis näitab, et ühe ja sama teepikkuse läbimiseks on võimalik rakendada erinevat energiahulka  $E_{max}$  või  $E_{min}$ , vastavalt valitud ajaperioodile  $T_{is\_min}$  või  $T_{is\_max}$ . Sellest tulenevalt on modelleerimisel täpsemate tulemuste saamiseks arvestada ka rongide sõiduplaane.



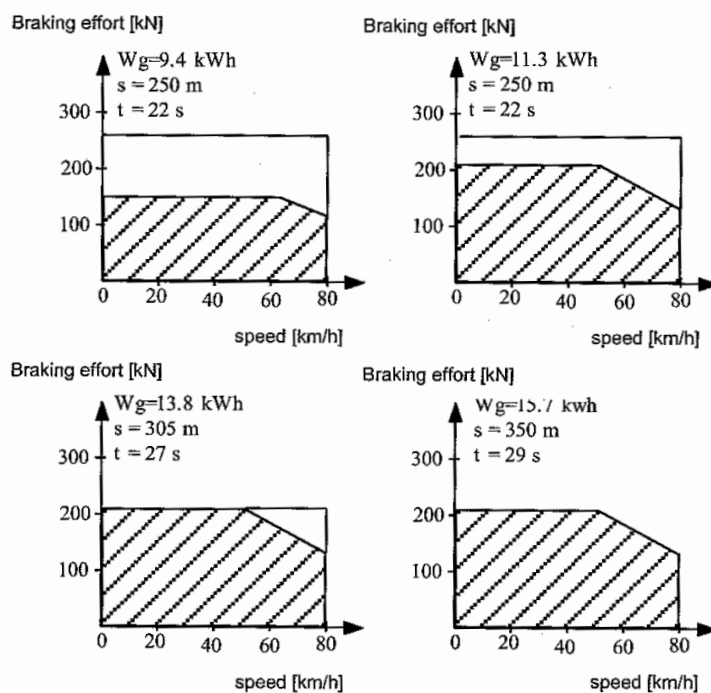
Joonis 5.12. Veduri võimsustarbimise sõltuvus sõidu ajast [11]

Rongide pidurdussüsteemidest on kasutusel mehaaniline ja ajamiga pidurdamine. Mehaanilise pidurduse korral suurendatakse hõõrdejõudu takistades selleks rataste pöörlemist ümber telje. Ajamiga pidurdamine põhineb mootori pöörlemistakistuse rakendamisel rataste pidurdamiseks. Rattad panevad mootori pöörlema ning viimane hakkab tööle generaatorina tootes elektrienergiat, sellest tulenevalt nimetatakse antud pidurdamismeetodit ka regeneratiivseks pidurdamiseks. Lisaks juba mainitutele võib pidurdamisviisiks nimetada ka vabasõitu, sellisel juhul küll kiirus langeb, kuid paraku pole see juhitav. Rongide lubatud pidurduskiirendus jääb vahemikku  $0,9-1,1 \text{ m/s}^2$ , vabasõidu korral orienteeruvalt  $0,1 \text{ m/s}^2$  [1]. Mootoriga pidurdamist võib omakorda jagada kaheks. Esimesel juhul mootori pöörlemistakistust kasutatakse rataste pidurdamiseks ehk regeneratiivne pidurdamine, kus mootor töötab generaatorina ja selle pöördejõuallikaks on rongi inertsjõu. Teisel juhul on mootor rataste pöördevõllist lahti ühendatud ning vedur ei tarbi ega genereeri elektrienergiat (välja arvatud omatarve) ehk teisisõnu on tegemist vabasõiduga (*coasting*). Kiiruse ja genereeritava võimsuse seost kajastab joonis 5.10. Parim koht regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutamiseks on metroo, kuna peatuste vaheline vahemaa on väike. Võrreldes tarbitava energiaga on pidurdamisel saadav energia kogus suhteliselt suur. Joonis 5.13 kajastab genereeritava energia sõltuvust peatuste vahekaugustest.



Joonis 5.13. Geneereeritava energia suhe peatuste vahekaugusesse [1]

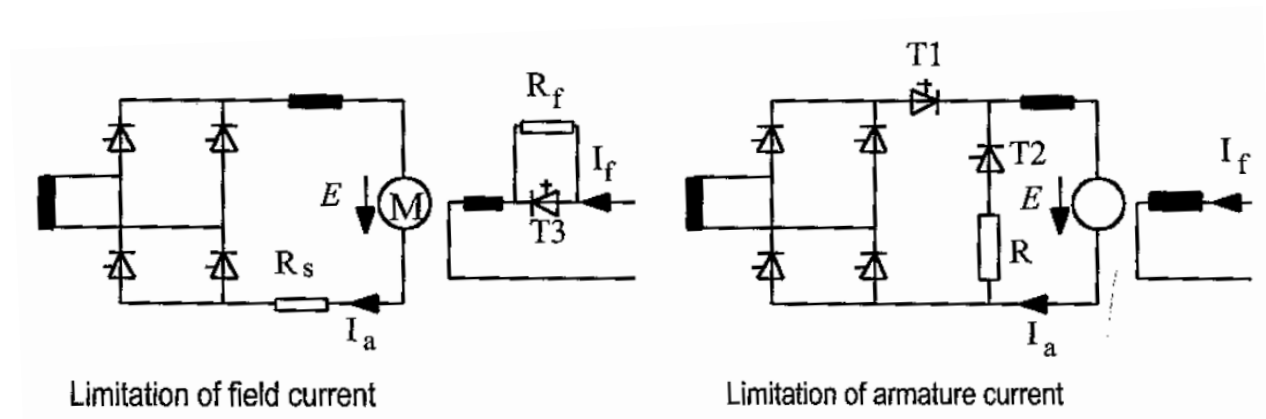
Pidurdamisel genereeritav võimsus sõltub pidurdamissüsteemist ning nende erinevust on kõige paremini märgata metroode puhul. Joonisel 5.14 on näha ühe ja sama metroorongi poolt genereeritav võimsus nelja erineva pidurdussüsteemi korral. Esimesel juhul pidurdab kogu rong, vedur rakendab nii regeneratiivset kui ka mehaanilist pidurdamist ning vagunid ainult mehaanilist. Teine juhtum sarnaneb esimesele, kuid ajamiga pidureid rakendatakse kuni piirväärtuseni 15%. Kolmandal juhul pidurdatakse rongi ainult veduriga ning viimasel juhul on tegemist ainult regeneratiivse pidurdamisega.



Joonis 5.14. Pidurdamisel genereeritav võimsus erinevatel pidurdamissüsteemide korral [1]

Vabasõitu rakendatakse enne pidurdamist. Kuna ka vabasõidul kiirus langeb, siis võib sel puhul vaadelda pidurduskarakteristikuid.

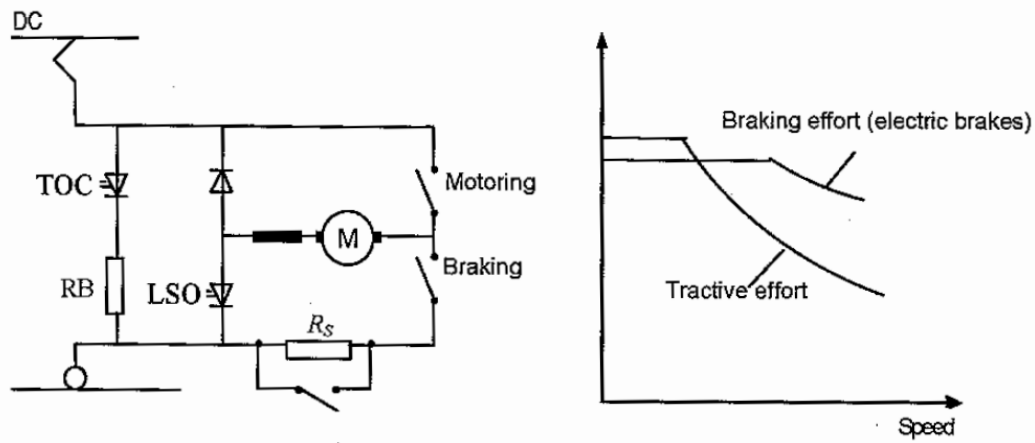
Sõltuvalt, kas tegemist reisi- või kaubarongiga erinevad rongide pidurduskarakteristikud. Vedurite pidurduskarakteristikutega saab tutvuda allikatest [3] ja [12]. Regeneratiivse pidurdamise saavutamiseks peab ajami juhtimisahelas kasutama türistore (Joonis 5.15). AC võrgus võib genereerimisel esineda olukord, kus võrgu ja mootori pinged avaldavad teineteisele teatavat mõju, mille tulemuseks on ajamis tekkiv suure väärtusega vool. Liigvoolu piiramiseks on kaks võimalust, selleks paigaldatakse lisatakisti, kas ankru või välja ahelasse (Joonis 5.15).



Joonis 5.15. Regeneratiivsel pidurdamisel ajamis tekkivate suurte voolude piiramine [1]

Regeneratiivse pidurdamise rakendamine täismahus on ebasoovitav maksimaalkiiruste juures, kuna kontaktvõrgus esinevad suured pinged kõikumised. Küll aga on regeneratiivse pidurdamise kasutamine soovitatav püsival pidurdamisel, sellisel juhul vähendatakse genereeritava võimsuse maksimumi ning pikendatakse genereeritavat perioodi, mida on võimalik saavutada kontrollides kiirust, mootori voolu ja pinget ning rataste libisemist.

Regeneratiivsel pidurdamisel edastatava energia hulk sõltub ka kontaktvõrgust ja selle vastuvõtlikkusest. Kui viimane osutub ebapiisavaks, siis pinge liinis tõuseb ning pidurdamine lakab. Selle vältimiseks rakendatakse lisatakistusi, mis vähendab liigset genereeritavat võimsust. Joonis 5.16 kajastab tarbitava ja genereeritava võimsuse võrdlust takistuse lisamisel. Genereeritava võimsuse suurendamiseks tõstetakse mootori pinget, selleks lisatakse jadaühendusse pidurdustakisti ( $R_s$ ). Juhul kui mootori pinge on väiksem kontaktvõrgu pingest, siis ühendatakse antud lisatakistus lahti.



Joonis 5.16. Regeneratiivsel pidurdamisel suurte voolude piiramine [1]

### 5.3 Vedurite matemaatiline modelleerimine

Vedurit on võimalik modelleerida täieliku mudelina, modelleerides selle igat komponenti: trafot, konvertereid ja mootorit. Selleks on vaja komponentide täpseid parameetreid. Antud tulemus kajastab aga konkreetse veduri käitumist ning veduritüübi muutumisel on vaja koostada uus mudel. Iga komponendi eraldi modelleerimisel saavutatakse täpsem tulemus.

Allikad, mis käsitlevad veduri mõju elektriraudtee kontaktvõrgule kajastavad ka erinevaid vedurite modelleerimise tüüpe. DC vedurite ühendamiseks AC võrku kasutatakse diode [13], türistore [14], [15] või türistor-diodaalaldeid [16]. Paraku toimub seetõttu kontaktvõrgu liinipinge moonutus, kuna antud seadmed genereerivad AC võrku harmoonikuid [17].

Modelleerimisel kasutatakse konkreetse veduriga sarnaseid alalditüüpe. Mudeli lihtsustamiseks asendatakse DC võrgu veomootori vooluallikas takistusega [13], kus alaldi ühendatakse AC võrku läbi pinget alandava trafo. Kuna seadmete parameetrid on tootjate ärisaladused, siis iga komponendi modelleerimist ei ole antud uurimustöös võimalik rakendada. Lisaks sellele ei luba antud meetod veduritüübi muutmisel teostada kiireid ümberarvutusi.

Teine võimalus veduri mudeli koostamiseks on vaadelda seda kui terviklikku tarbijat. Antud meetodit sobib rakendada ainult siis kui puuduvad konkreetset veduri andmed. Veduri üldist modelleerimist on võimalik teostada neljal viisil [18]. Nendeks on lineaarne-, näivtakistuse-, voolu- ja pinge mudel. Antud modelleerimisviiside skeeme kajastab joonis 5.17 ning järgnevatel alapeatükkides vaadeldakse iga mudelit detailsemalt.



Võimsuse mudelit rakendatakse laialdaselt kolmefaasiliste võimsusvoo probleemide lahendamisel. Antud mudel on rakendatav kui veduri kontrolleriiga on võimalik mõõta aktiiv- ja reaktiivvõimsusi ning võimsustegurit. Rakendades veojõu ja liikumise informatsiooni ning Newtoni liitumisseadusi on võimalik arvutada mudeli parameetreid.

Käesolevas uurimustöös on rakendatud näivtakistuse mudelit, kuna selle jaoks on olemas vajalikud lähteandmed ning antud mudel ei koorma ülemäära modelleerimistarkvara. Tähelepanu tuleb pöörata modelleerimisel tehtud lihtsustusele. Tänapäeva vedurid sisaldavad jõuelektronika komponente, mis genereerivad harmoonikuid. Koostatud mudel ei modelleeri harmoonikuid ning seega on PSCAD-is koostatud veduri mudelisse lisatud harmoonikute genereerimine eraldi.

## **5.4 Kokkuvõte**

Antud peatükis keskenduti elektriraudteedel rakendatavatele veduritüüpidele, nende karakteristikutele ja matemaatilistele mudelitele. Raudteel kasutusel olevatel veduritel ja nendes rakendatavatel tehnoloogiatel on oluline roll nii elektriraudteesüsteemi sisestele mõjudele ja nende ulatusele kui ka nende kandumisele kogu ülejäänud elektrivõrku. Sihtotstarbest tulenevalt jaotatakse vedureid reisirongi-, kaubarongi- ja universaalveduriteks ning omakorda jaotatakse neid veel maksimaalkiiruse ja veojõu järgi.

Vedureid klassifitseeritakse ja tähistatakse vastavalt nende vedavate sildade järgi ning oluliseks karakteristikuks on ka ajamis kasutatav tehnoloogia. Kasutusel on nii alalisvoolu kui ka vahelduvvoolu ajameid, kusjuures valdavalt eelistatakse alalisvooluajameid, kuna need on paremini juhitavad. AC toitega kontaktvõrkude korral kasutatakse vedurites alaldi ning DC ajami kombinatsiooni. Peatükis analüüsiti täpsemalt takistitel põhinevat-, dioodalaldi-, türistor-inverter- ja transistor-inverter ajamit. Takistitel põhinev ajam tänapäeval enam rakendust ei leia. Diodaalaldil põhinev ajamitüüp on oma ehituselt lihtne ja seega rakendatakse seda ka tänapäeval. Inverterite kasutamine võimaldab veosüsteemis rakendada kolmefaasilisi asünkroonmootoreid. Türistor inverteri kasutamine võimaldab mootori pöördemomendi sujuvat reguleerimist, mis

omakorda muudab veduri efektiivsemaks, kuna võimaldab saadaoleva veojõu maksimaalset rakendamist. Samas on nende puuduseks madal võimsustegur ja tarbitava voolu tugev moonutus. Kõige uuem põlvkond elektriraudtee süsteemides on transistor inverteritel põhinev veosüsteem. Tegemist on eelmisega sarnase lahendusega, kuid türistoride asemel kasutatakse transistore. Viimased suudavad välja lülitada kõrge efektiivväärtusega voolusid olles sealjuures kompaktsed ja vajades vähem jahutamist. Samuti on vähendatud moonutused voolu lainekujus ning veduri poolt tekitatud harmoonikud kontaktvõrgus.

Elektriraudtee veduri elektrienergia tarbimine sõltub peamiselt rongi massist, liikumise kiirusest ja kiirendusest. Rongi ajamite võimekust iseloomustavad rongi kiirenduskarakteristikud, mis erinevad teineteisest reisi- ja kaubarongide puhul. Analüüsidest erinevaid graafikuid on tulemuseks saadud, et veojõu väärtus muutub kiiruse algsel kasvamisel tähtsusetult, kuniks vedur saavutab poole oma maksimaalsest kiirusest. Edasisel kiiruse kasvamisel väheneb aga veojõu väärtus märgatavalt. Antud perioodil saavutab vedur ka oma maksimaalse kasuteguri.

Rongide pidurdussüsteemidest on kasutusel mehaaniline ja ajamiga pidurdamine. Esimesel juhul suurendatakse hõõrdejõudu takistades selleks rataste pöörlemist ümber telje. Ajamiga pidurdamine ehk regeneratiivne pidurdamine põhineb mootori pöörlemistakistuse rakendamisel rataste pidurdamiseks. Lisaks arvestatakse teatud juhtumitel pidurdussüsteemiks ka vabasõitu. Regeneratiivse pidurdamise rakendamine täismahus on ebasoovitav maksimaalkiiruste juures, kuna kontaktvõrgus esinevad suured pinged kõikumised. Küll aga on selle kasutamine soovitatav püsival pidurdamisel.

Veduri modelleerimisel saavutatakse täpsem tulemus selle iga komponendi eraldi modelleerimisel. Selleks on vaja aga iga komponendi täpseid parameetreid ja saadud tulemus kajastab ainult konkreetse veduri käitumist ning veduritüübi muutumisel on vaja koostada uus mudel. Kuna tootjad oma seadmete parameetreid ei avalda ning antud meetodi korral ei saa teha kiireid ümberarvutusi veduritüübi muutumisel, siis antud uurimustöös seda ei rakendata. Teiseks lahenduseks on mudeli koostamisel vaadelda vedurit kui tervikut, selleks on võimalik koostada kas lineaarne-, näivtakistuse-, voolu- või pingemudel. Lineaarse mudeli puuduseks on iga veduri kohta mahuka andmebaasi koostamise vajadus modelleerimistarkvaras. Näivtakistuse mudel on lihtne ning ei vaja suurt andmebaasi ega mahukaid arvutusi, kuna mudelis kasutatakse vaid nelja mõõdetud parameetrit. Voolu mudelit saab rakendada ainult juhul kui on olemas andmed faasinurga kohta. Sarnaselt lineaarsele mudelile vajab ka antud mudel mahukat and-



mebaasi. Võimsuse mudelit rakendatakse aga laialdaselt kolmefaasiliste võimsusvoo probleemide lahendamisel. Tulenevalt olemasolevatest lähteandmetest leidis antud uurimustöös rakendust näivtakistuse mudel.

## 5.5 Kirjandus

- [1] Östlund, S., Electric Railway Traction. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2012
- [2] Феоктистов, В. П., Рябцев, Г. Г., Просви́ров, Ю. Е., Пупынин, В. Н., Рыбников, Е. К., Володин, С. В., Иванов, В. В., Электрические железные дороги, В. П., Просви́ров, Ю. Е. Феоктистов, Ed. Москва, Самара: СамГАПС, 2006.
- [3] Дубровский, З., Попов, В., Тушканов, Б., Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. Москва: Транспорт, 1991.
- [4] Тищенко, А. И. Ed., Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам. Москва: Транспорт, 1976, vol. 1.
- [5] Railway Technical Web Pages. High Speed Train Links Page. [Online]. <http://www.railway-technical.com/hst-01.shtml>
- [6] Köhler, T. B. InterCityExpress (ICE)/InterCity-NeiTech (ICT). [Online]. <http://www.railfaneurope.net/ice/ice.html>
- [7] Railway Technical Web Pages. Wheel Arrangements. [Online] <http://www.railway-technical.com/whlarr.shtml>
- [8] Energy Efficiency Technologies for Railways. (2002, October) IGBT. [Online]. [http://www.railway-energy.org/static/IGBT\\_28.php](http://www.railway-energy.org/static/IGBT_28.php)
- [9] Быстрицкий, Х., Дубровский, З., Ребрик, Б., Устройство и работа электровозов переменного тока: Учебник для технических школ ж.-д. транспорта, 4th ed. Москва: Транспорт, 1982.
- [10] Chen, C. S., Chuang, H. J., Fan, L. J., Design of Main Transformer Capacity for Electrified Railway Power Systems, in International Conference on Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000., vol. 1, Perth, WA, Australia, 4-7 December 2000, pp. 311 - 316 vol.1.
- [11] Bocharnikov, Y. V., Tobias, A. M., Roberts, C., Hillmansen, S., Goodman, C. J., Optimal Driving Strategy for Traction Energy Saving on DC Suburban Railways, IET Electric Power Applications, vol. 1, no. 5, pp. 675-682, September 2007.
- [12] Дубровский, З., Курчатова, В., Томфельд, Л., Электровоз. Управление и обслуживание. Москва: Транспорт, 1979.

- [13] Tan, P. S., Holmes, D. G., Morrison, R. E., Control of active filter in 25kV ac traction systems, Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University, Australia., [Online]. <http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec00/tan00.pdf>
- [14] Tan, P. C. ; Morrison, R. E. ; Holmes, D. G., Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in a 25 kV Electrified Railway System Using a Shunt Active Filter Based on Voltage Detection, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 2, pp. 575 - 581, April 2003.
- [15] Tan P. C., Loh P. C., Holmes, D. G., Optimal impedance termination of 25-kV electrified railway systems for improved power quality, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1703-1710, April 2005.
- [16] Shenoy, J. U., Sheshadri, K. G., Parthasarathy, K., Khincha, H. P., Thukaram, D. MATLAB/PSB Based Modeling and Simulation of 25 kV AC Railway Traction System - a Particular Reference to Loading and Fault Conditions, in IEEE Region 10 Conference TENCON 2004, vol. 3, Chiang Mai, Thailand, 21-24 November 2004, pp. 508 - 511 Vol. 3.
- [17] Balazs, G. G., Horvath, M., Schmidt, I., Kiss, P. Examination of New Current Control Methods for Modern PWM Controlled AC Electric Locomotives, in 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD 2012, Bristol, UK, 27-29 March 2012, pp. 1-5.
- [18] Kulworawanichpong, T. Optimising AC Electric Railway Power Flows with Power Electronic Control, Electronic, Electrical and Computer Engineering, University of Birmingham, PhD Thesis 2003. [Online]. <http://etheses.bham.ac.uk/4/1/Kulworawanichpong04PhD.pdf>
- [19] Battistelli, L., Pagano, M., Proto, D., Amendola, A., Candurro, L., Pignotti, A. Short Circuit Modelling and Simulation of 2×25 kV High Speed Railways, in Second Asia International Conference on Modeling & Simulation, 2008. AICMS 08, Kuala Lumpur, Malaysia, 13-15 May 2008, pp. 702-707.
- [20] Dolara, A., Gualdoni, M., Leva, S. EMC Disturbances on Track Circuits in the 2×25kV High Speed AC Railways Systems, in IEEE Trondheim PowerTech, 2011, Trondheim, Norway, 19-23 June 2011, pp. 1-9.
- [21] Guo, W., Mingxing, T., Enen, R. Identification of Hybrid Active Compensation Topology for Electrified Railway Load, in International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008., Wuhan, China, 17-20 October 2008, pp. 2092 - 2095.

## 6. Ülekandevõrgu, kontaktliini ja elektrirongide modelleerimine

Käesolev peatükk koondab enda alla antud uurimustöös vajaminevate mudelite kirjeldamise ja nende koostamise. Peatükk 6.1 selgitab 110 kV ülekandevõrgu modelleerimiseks vajalikke parameetreid ning kirjeldab ülekandevõrgu mudeli koostamiseks ja optimeerimiseks rakendatud lihtsustusi. Peatükis 6.2 keskendutakse elektriraudtee kontaktvõrgu modelleerimisele. Ülevaade antakse veoalajaamade toitetrafode mudelistest ja põgusalt käsitletakse nende parameetrite määramist ning vajadusel puuduvate tuletamist. Näite põhjal on antud detailne ja joonistega illustreeritud ülevaade kontaktliini modelleerimisest ning selleks vajalike elektriparameetrite arvutamisest rakendades *Carson*'i meetodit. Kirjeldatud on kontaktvõrgu mudeli koostamist *PSCAD* tarkvaras. Antud peatüki viimane osa kirjeldab elektriraudtee vedurite mudeleid ja nende modelleerimist *PSCAD* tarkvaras.

### 6.1 Eesti elektrisüsteemi 110 kV võrgu modelleerimine

Tulenevalt erinevate riikide praktilistest kogemustest ning elektriraudteele iseloomulikest karakteristikutest, mida täpsemalt on käsitletud peatükis 3, toidetakse elektriraudtee kontaktvõrku kõige kõrgema võimaliku pingestmega elektrivõrgust. Vastavalt avaldatud Rail Balticu trassivariantidele on neile lähedasemaiks kõrgeimaks pingestmeks 110 kV ülekandevõrgust. Määratlemaks elektriraudtee mõju Eesti elektrisüsteemile on vajalik Eesti elektrisüsteemi 110 kV osa modelleerimine *PSCAD* tarkvaras. Tulenevalt Rail Balticu trassivariantidest on modelleerimiseks valitud trasside lähedane 110 kV elektrivõrk ning ülejäänud elektrivõrk on ekvivalenteeritud ja modelleeritud süsteemi äärepunktidesse. Seega ei ole modelleeritud ei 330 kV ülekandevõrku ega enamikku Ida ja Lõuna-Eesti 110 kV elektrivõrgust. Rail Balticu trassikoridoride ja lähedusse jääva elektrivõrgu mudelit *PSCAD*-is illustreerib joonis 6.1.

Süsteemi modelleerimisel kasutatud reaalse elektrivõrgu parameetrid on saadud Elering AS-ist. 110 kV ülekandevõrgu mudeli koostamisel on täielikult modelleeritud 110 kV ülekandeliinid, trafod, jaotusvõrgu koormused ning kondensaatorpatareid. Andmed nende modelleeritud 110 kV ülekandevõrgu komponentide kohta on esitatud peatükis „Lisad“. Tulenevalt mudeli modelleerimise suures mahust ning simulatsioonide jooksutamiseks vajamineva arvutusvõimsuse piirangutest, on vaadeldava mudeli versioonist välja jäetud 110 kV elektrivõrguga antud piirkonnas ühendatud generaatorite (Väo KTEJ, Iru EJ ja prügipõletus, Pärnu KTEJ) mudelid.

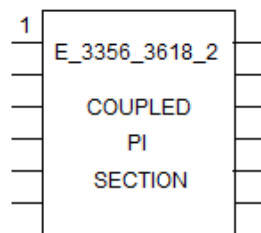
*Joonis 6.1. Modelleeritud Eesti 110 kV elektrivõrgu PSCAD skeem*







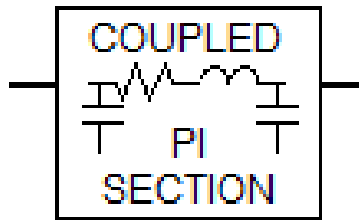
Tulenevalt modelleeritava elektrivõrgu keerukast struktuurist esineb piirkonniti õhuliine, mille kogupikkus on väiksem kui 10 km. Need õhuliinid on konverteeritud eralisteks ekvivalentseteks *PI* sektsioonideks. Selline konverteerimine on oluline lihtsustus mudeli koostamisel, kuna võimaldab suurendada lubatud väiksemat arvutussammu ning lühendada simulatsiooniaega. Õhuliinide konverteerimiseks on aga esmalt vaja neid modelleerida kasutades selleks juba eelnevalt kirjeldatud geomeetriaal põhinevat mudelit. Alles seejärel saab rakendada *PSCAD* tarkvarasisest algoritmi, mis konverteerib selle eriliseks *PI*-skeemiks. Antud skeemi *PSCAD* graafiline kujutis on esitatud joonisel 6.7. Oma olemuselt on see *PI*-skeem klassikalisest *PI*-skeemist täpsem, kuna *PSCAD* konverteerib õhuliini otse maatriks kujule. Klassikalises *PI*-skeemis rakendatakse aga passiivelementidel põhinevat lähenemist. Tänu maatrikskujule konverteerimisele on *PI*-skeemis täpselt esitatud küll nulljärgnevustakistused, kuid lihtsustuse tõttu puuduvad sel sageduslike laineprotsesse kirjeldavad osad. Arvestades elektrivõrgu konfiguratsiooni ning asjaolu, et konverteeritud õhuliinid on lühikesed, ei mõjuta tehtud lihtsustus olulisel määral ülekandevõrgu mudeli täpsust.



Joonis 6.7. Konverteeritud õhuliini *PI*-skeem *PSCAD* tarkvaras

Ülekandevõrgu kaabelliinid on modelleeritud kasutades *PSCAD* standardmudelit „*Coupled PI Section*“. Kuigi *PSCAD* võimaldab kaableid modelleerida ka spetsiaalse kaabli mudeliga on sellest loobutud, kuna puudusid detailsed lähteandmed kaablite geomeetria, materjalide ning ehituse kohta. „*Coupled PI Section*“ mudeli kasutamine kaabelliinide modelleerimiseks *PSCAD*-is on praktikas laialt levinud, kuna antud mudelis on esitatud nii induktiivsed kui ka mahtuvuslikud sidestused faaside vahel. Seetõttu osutub antud mudeli kasutamine enamikel juhtudel piisavalt täpseks. Faaside vahelised sidestused on kaablite modelleerimisel olulised, kuna nii induktiivne sidestus kui ka faaside mahtuvused on kaabelliinide puhul oluliselt suuremad kui õhuliinidel. Seega osutub klassikaline *PI*-skeem kaabelliinide modelleerimiseks ebatäpseks, kuna oluline osa parameetritest jääb arvestamata. Kasutatud „*Coupled PI Section*“ *PSCAD*-i mudel on kujutatud joonisel 6.8.





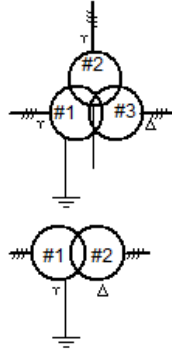
Joonis 6.8. „Coupled PI Section“ mudeli graafilise representatsiooni PSCAD-is

Joonis 6.9. „Coupled PI Section“ konfiguratsiooni aken PSCAD tarkvaras

„Coupled PI Section“ seadistamisel (Joonis 6.9) kasutatakse kaablikataloogides toodud andmeid, seega on antud mudeli kasutamine ka mugav. Paratamatult on seadistamiseks vajalike nulljärgnevustakistuse parameetrite määramine keerukas, mistõttu tuleb selleks kasutada estimateerimise funktsiooni. Antud funktsioon põhjustab küll teatavat täiendavat ebatäpsust, kuid arvestades kaabelliinide lühikest kogupikkust on see marginaalne ning ei oma mõju ülejäänud mudeli täpsusele.

### 6.1.3 Ülekandevõrgu trafode mudelid

110 kV ülekandevõrgu jõutrafode modelleerimisel on lähtunud Elering AS-ilt lähteandmetena saadud elektrivõrgu skeemist ning trafode nimiparameetritest. Trafode modelleerimiseks on kasutatud PSCAD tarkvara kolmefaasilisi standardtrafo mudeleid. Modelleeritavas elektrivõrgus on kasutusel kahte tüüpi trafosid, standardsed kahe- ja kolme mähiselised jõutrafod, sõltuvalt sellest mitu keskpinge pingest alajaamas esineb. Joonisel 6.10 on esitatud ühe- ja kahe sekundaarmähisega jõutrafode PSCAD mudelid.



Joonis 6.10. Kahe ja kolme mähisega jõutrafode mudelid PSCAD-is

Trafode mudelid on antud mudelisse kaasatud täiendavalt, võimaldamaks hinnata elektriraudteest tekkida võivate mõjude edasikandumist ja ulatus ülekandevõrgust jaotusvõrku. Trafode modelleerimisel on lihtsustusena loobutud magneetimisahela modelleerimisest ning pingestme regulaatorist, vähendades nii mudeli arvutusmahukust. Antud lihtsustus on lubatud kuna uurimistöo peamine fookus on suunatud 110 kV võrgule ning jaotusvõrku on modelleeritud koormustena, seega puudub vajadus selles suunas täpsemaks modelleerimiseks.

Joonisel 6.11 on esitatud kahe mähisega trafo konfiguratsiooni aken, millel on näha trafo mudeli seadistamiseks vajaminevaid andmeid. Vajalike andmete puudumisel on võimalik rakendada ideaalse trafo funktsiooni, kuid sellisel juhul ei arvestata trafo kadusid ning magneetimisahelat. Trafo konfiguratsiooni juures tuleb tähelepanu pöörata asjaolule, et trafo rauas- ja vaseskadude arvestamisel teisendatakse need suhtühikutesse trafo nimivõimsuse suhtes.

[xfmr-3p2w] 3 Phase 2 Winding Transformer	
Configuration	
Transformer Name	Lihula_C1T
3 Phase Transformer MVA	6.3 [MVA]
Base operation frequency	50 [Hz]
Winding #1 Type	Y
Winding #2 Type	Delta
Delta Lags or Leads Y	Lags
Positive sequence leakage reactance	0.105 [pu]
Ideal Transformer Model	No
No load losses	0.0019 [pu]
Copper losses	0.00748 [pu]
Tap changer on winding	None
Graphics Display	Single line (circles)
Display Details?	No
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help..."/>	

Joonis 6.11. Kahe mähisega trafo konfiguratsiooni aken PSCAD tarkvaras

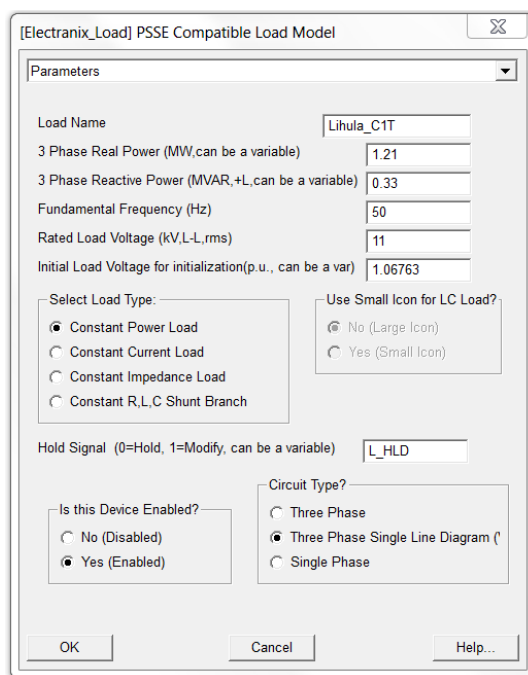
## 6.1.4 Ülekandevõrgu koormusmudelid

Ülekandevõrgu koormused on modelleeritud kasutades *PSCAD* lisaprogrammipaketis *E-TRAN* spetsiaalseid koormusmudeleid. Koormusmudelite kasutamiseks vajalik täiendav liides on antud Eleringi AS poolt. *E-TRAN*-i koormusmudelite kasutamise peamisteks põhjusteks on nende stabiilsus ning kergem seadistatavus võrreldes standardse *PSCAD* „fixed-load“ mudeliga. Joonisel 6.12 on esitatud *E-TRAN* tarkvara koormusmudel.



Joonis 6.12. Modelleeritud *E-TRAN* koormusmudel

Ülekandevõrgu koormuste modelleerimisel on aluseks võetud Elering AS lähteandmetena saadud miinimum- ja maksimum koormusstsenaariumid 2020 ja 2030 aastaks. Antud stsenaariumitele vastavad koormused on esitatud aruande lisades. Tulenevalt käesoleva uurimistöö iseloomust on eraldi mudelid koostatud mõlemale juhule ning koormuste modelleerimisel on lähtutud maksimum koormusstsenaariumist. *E-TRAN* tarkvara koormusmudeli konfiguratsiooniaken *PSCAD* tarkvaras on toodud joonisel 6.13.



Joonis 6.13. *E-TRAN* koormusmudeli konfiguratsiooni aken *PSCAD* tarkvaras

Koormusmudeli võimsused on seadistatud vastavalt lähteandmetena esitatud normaalskeemi püsitalitlusarvutustele. Kuna lähteandmetes on koormused antud alajaamade 110 kV lattidel, siis on lihtsustusena on need jaotatud alajaama trafode vahel võrdselt. Kolme mähisega trafode

korral on koormus kahe sekundaarmähise vahel jaotatud lineaarselt ehk kõrgema pingega mähised on rohkem koormatud ning analoogselt madalama pingega mähised vähem. Koormusmudelite nimipinged on seadistatud vastavalt trafode sekundaarpingetele, seejuures on iga koormuse pingestet individuaalselt seadistatud nii, et mudeli pühistalitus oleks saavutatud soovitud nimikoormus.

Koormusmudelite tüübiks on valitud konstantse võimsusega koormused, kuna käesolevas uurimistöös vaadeldakse protsesse ülekandevõrgus ning seega näivad jaotusvõrgu koormused lühikeses perioodis konstantsena tulenevalt pingestme regulaatorite tööst.

Kasutades *E-TRAN* konstantse koormusega mudelitüüpi osutub võimalikuks trafode modelleerimise lihtsustus jättes mudelist välja pingestme regulaatorid, kuna sarnane käitumine on saavutatav koormusmudeliga.

## **6.2 Elektriraudtee kontaktvõrkude modelleerimine**

Järgnev alapeatükk vaatleb põhjalikult kogu elektriraudtee kontaktvõrgu ja selle komponentide modelleerimist. Eraldi tuleb vaatluse alla raudtee veotrafode mudelite koostamine, nii teoreetilisest aspektist kui ka *PSCAD* tarkvaras. Antakse detailne ja illustreeritud kirjeldus kontaktliini juhtide parameetrite arvutamise meetodikale võttes arvesse nende geometriat liinil. Viimaks kirjeldatakse saadud juhtide parameetrite põhjal kontaktvõrgu mudeli koostamist *PSCAD* tarkvaras.

### **6.2.1 Raudtee veotrafod**

Kontaktvõrgus rakendatavad raudteetrafod mõjutavad nii rongile edastatava veojõu efektiivsust kui ka ühefaasilisest koormusest tulenevate probleemide kandumise ulatust 3-faasilisse ülekandevõrku. Nende asjaolude tõttu osutub vajalikuks raudteetrafode modelleerimine. Järgnevalt tulevad vaatluse alla raudteevõrgus enam kasutust leidvad veoalajaama trafod ja nende mudelid. Modelleeritud trafotüüpe ja nende nimiaandmeid kajastab tabel 6.2. Kõikide veoalajaama trafode mudelid on *PSCAD*-is koostatud moodulitena, hõlbustamaks nende lisamist edaspidi arutluse alla tulevasse kontaktliini mudelisse. Elektriraudtee trafode modelleerimisel on lähtutud kirjandusallikates avaldatud andmetest. Veoalajaamade trafode nimivõimsused jäävad enamasti 10 kuni 60 MVA vahele [1]. Allikate [2-6], põhjal leiavad laialdasemat rakendust trafod nimivõimsusega 20 ja 60 MVA, seda nii 1-faasilise kui ka eritrafoühenduste korral. Trafode modelleerimisel on parameetrite valikul lähtutud allikast [6].

$I_B$  $U_L$ 

Joonis 6.14. 1-faasilise trafo lülitusskeem

1-faasilisel toitetrafol on üks primaarmähis ja üks sekundaarmähis. Trafo ülekandesuhe  $k = \frac{N_1}{N_2}$

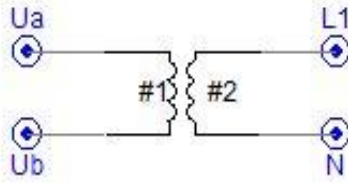
, kus  $N_1$  tähistab keerdude arvu primaarmähisel ja  $N_2$  keerdude arvu sekundaarmähisel, on 1:1.

Trafo pingesuhte primaar- ja sekundaarpoole vahel avaldub kujul (6.1) ning voolu suhte kujul (6.2) [7].

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B = k\bar{U}_L \quad (6.1)$$

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{I}_L}{k} \quad (6.2)$$

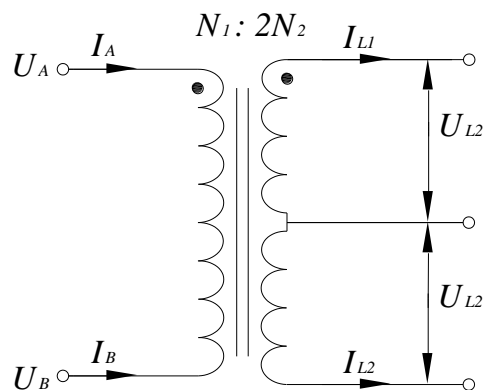
1-faasilise veoalajaama trafo mudeli koostamisel on kasutatud *PSCAD*-i kõige lihtsamat 1-faasilise kahe mähisega jõutrafo tüüpmodelit, mida kajastab joonis 6.15.



Joonis 6.15. 1-faasilise trafo mudel PSCAD-is

### Autotrafo

Veolajaama paigaldatud autotrafo (AT) erineb 1-faasilisest trafost oma sekundaarmähisel paikneva keskväljavõtte poolest. Kontaktvõrgus on autotrafo sekundaarmähis ühendatud kontaktliini juhile ja sellega paralleelselt kulgevale fiidriiliinile ehk tagasivoolufiidrile. Trafo keskväljavõttele on ühendatud raudtee relsid. Trafo ülekandesuhe  $k$  kontaktjuhi ja fiidriiliini vahel on 1:1, kuid tänu relssidega ühendatud keskväljavõttele on rongile edastatav pinge poole väiksem (27,5 kV). AT lülituskeem veojõusüsteemis on toodud joonisel 6.16. Trafo pingete ja voolude suhteid primaar- ja sekundaarpoole vahel kajastavad võrrandid (6.3) ja (6.4) [8].

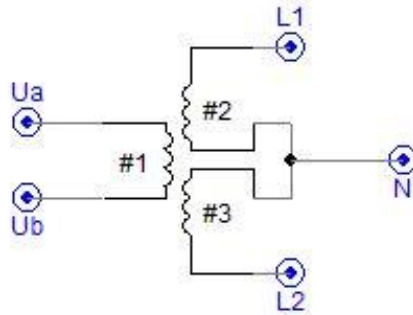


Joonis 6.16. AT lülituskeem

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{L2} \quad (6.3)$$

$$\bar{I}_A - \bar{I}_{L1} = \bar{I}_A - \bar{I}_{L2} \Rightarrow \bar{I}_A = \frac{1}{2}\bar{I}_{L1} - \frac{1}{2}\bar{I}_{L2} \quad (6.4)$$

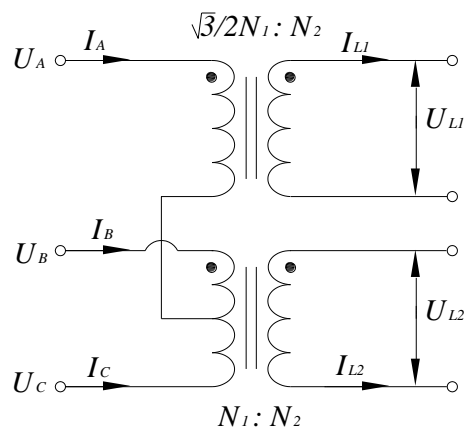
Autotrafole koostatud mudel on toodud joonisel 6.17. Kuna PSCAD-is puudub autotrafole vastav tüüpmodel, siis on modelleerimisel kasutatud 1-faasilise lõhismähisega jõutrafo tüüpmudelit, mille sekundaarmähised on omavahel ühendatud ning maandatud [9].



Joonis 6.17. AT mudel PSCAD-is

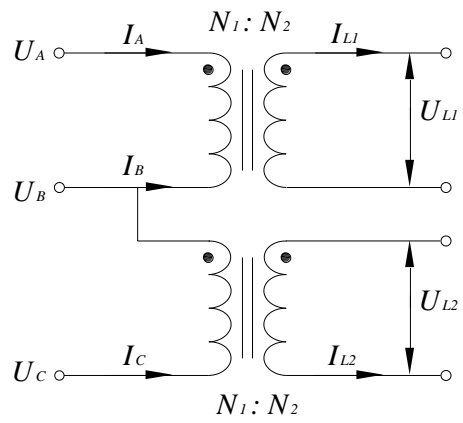
### Scott-trafo

Veojõusüsteemis ühefaasilise koormuse tagajärjel tekkiva pinge asümmeetria vähendamiseks rakendatakse veolajaamades eritüüpi trafotühendusi. Levinuimaks trafotühendiks on *Scott-trafo*, mis koosneb kahest 1-faasilisest trafost – keskväljavõttega põhitrafost ja vahetrafost. *Scott-trafo* ülekandesuhe on  $\sqrt{3}N_1:2N_2$  ning võimsus edastatakse ülekandesüsteemi 3-faasi kaudu kahte 1-faasilisse veojõusüsteemi [7]. Joonisel 6.18 on toodud *Scott-trafo* lülituskeem.









Joonis 6.20. V-ühendusega trafo lülitusskeem

Lisaks eelpool toodud trafotüüpidele leiavad veoalajaamades vähemal määral kasutust ka tasa-kaalustatud trafoühendus, *Woodbridge- ning Le Blanc* trafo, mida kajastatakse täpsemalt näiteks allikates [7], [11] ja [12] ning käesoleva aruande peatükis 3.5.

### 6.2.2 Kontaktliini modelleerimine

Kontaktvõrgu süsteemiga tagatakse energia ülekanne vedurile. Kontaktvõrgu modelleerimine on keeruline ülesanne, kuna õhuliinidest koosnev kontaktliini süsteem sisaldab palju paralleelseid juhte, mis omavad erinevaid potentsiaale, vahekauguseid ja ristlõikeid. Nendeks on fiidriini ( $F$ ) ehk abitoiteliini, kontaktõhuliini ( $OC$ )-, kande ( $K$ )-, maandus ( $G$ )- ja tagasivoolujuhe ( $T$ ) ning lisaks relsid ( $R_1, R_2$ ). Kahe rööppaari raudteeliini puhul on tegemist sümmeetrilise süsteemiga, kus kontaktliinis on vastavad juhid mõlemale rööppaari (Joonis 6.22). Juhtide ühikuline aktiivtakistus  $R$  on leitavad vastavalt juhtmemargile ja –materjalile tootjakataloogidest.

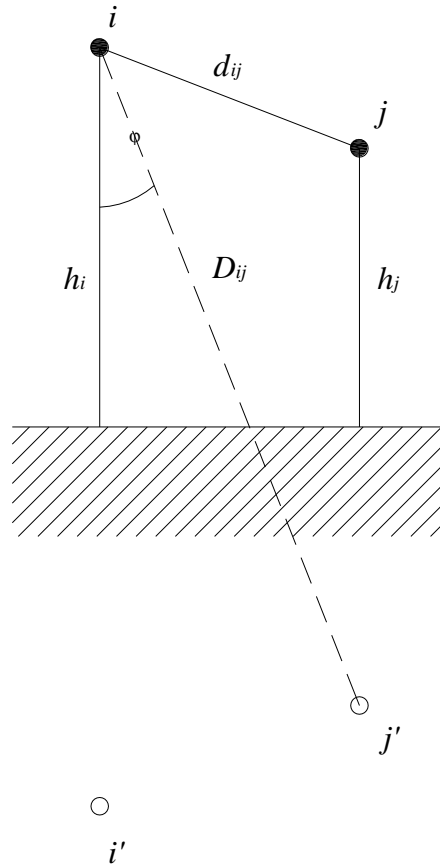
*Tabel 6.3. Kontaktliini juhtide nimiandmed*

Juhtmemarkide ja ristlõigete valikul mudeli koostamiseks on lähtunud kirjandusest leitud andmetest ning erinevates süsteemides ja riikides kasutatavatele tüüpilisematele suurustele. Allikatest [2] [13] ja [14] leiab erinevates riikides kasutusel olevaid kontaktliini juhtmete marke ja ristlõikeid. Relsi parameetrid mudelisse on võetud vastavalt allikale [15]. Tabelis 6.3 kajastatud juhtide iseloomulikud parameetrid ( $D, r, R_i$ ) on saadud vastavalt juhtmemarkidele tootjakataloogidest [16] ja [17].

Lisaks juba eelnevalt mainitud juhtide paljususele teeb kontaktliini modelleerimise veelgi keerukamaks nende endi vahel ning juhi ja maa vahel esinev induktiivne ja mahtuvuslik sidestus. Seega omavad kontaktvõrgu süsteemi juhid lisaks enda-induktiivsustele  $X_i$  ja mahtuvusjuhtivustele (maa suhtes)  $C_i$  ka juhtide vahel esinevaid induktiivsusi-  $X_m$  ja mahtuvusjuhtivusi  $C_m$ .

*Joonis 6.22. Kontaktliini juhtide geomeetiline paiknemine raudteeliinil*

Kontaktliini takistuse arvutamisel on rakendatud *Carson*'i arvutusmetoodikat, mis arvestab homogeenses väljas maapinna tagastusefekti. Antud metoodika on kogu maailmas üks levinuimaid raudtee kontaktliinide takistuse leidmisel [15], [18], [19]. *Carson*'i metoodika käsitleb laine levikut paralleelselt maapinnaga asetsevates liinides arvestades naaberliinide induktiivset ja mahtuvuslikku mõju [20] ja juhtide geomeetrist paiknemist liinil. *J. R. Carson* oli esimene, kes uuris maapinna takistust ehk mööda maapinda kulgeva vooluraja takistust. Esmalt tuletas ta teljesuunalise lahenduse elektriväljale maapinnas ja sidus selle läbi *Maxwell*'i võrrandite [20] magnetvälja komponentidega. *Carson* jagas magnetvälja komponendid kaheks osaks: juhete läbiva voolu tagajärjel tekkivaks väljaks ning maapinda läbiva voolu tagajärjel tekkivaks väljaks. Eelduseks oli, et juhe on piisavalt väikese raadiusega, et voolu jaotus üle juhi ristlõikepinna oleks elektrivälja suhtes sümmeetriline. Teljesuunaline elektriväli avaldati hiljem skalaar- ja vektorsuurustena [21]. Laine levimist homogeenses väljas paiknevatel õhuliinidel ja *Carson*'i metoodika täpsemat sisu käsitleb [20]. Juhtide geomeetria arvesse võtmiseks rakendatakse peegelduse meetodit (Joonis 6.23), kus tegelikele juhtidele leitakse nende peegeldused mingi peegelpinna, enamasti maa, suhtes.



Joonis 6.23. Juhtide peegeldusmeetod

Järgnevalt tuleb arutlusele kontaktliini mudeli koostamiseks vajalike juhtide parameetrite leidmine. Arvutuste meetodika on kokku koondatud allikate [15], [19], [18], [22] põhjal. Carson'i meetodikast tulenevalt avalduvad kontaktliini takistused juhi enda-takistusena ehk takistusena maapinna suhtes ja kahe juhi omavahelise takistusena. Juhhi enda-takistus sisaldab kolme komponenti (6.17): kinnise volukontuuri induktiivsust  $X_i$  (eeldusel, et juht ja maa on ideaalsed juhid), juhi sisemist takistust  $Z_c$  ning maapinna takistust  $Z_g$  [15].

$$Z_{ii} = jX_i + Z_c + Z_g \quad (6.17)$$

Kahe maapinnaga paralleelselt teatud kõrgusel paikneva volujuhi vastastikune takistus sisaldab endas kahte komponenti (6.18): kahe juhi vahelist vastastikust induktiivsust  $X_m$  (juhid ja maapind on ideaalsed) ja maapinna takistust  $Z_g$ , mis antud juhul on ühine mõlemale juhile [15].

$$Z_{ij} = jX_m + Z_g \quad (6.18)$$

Avaldises (6.17) esinev juhi sisemine takistus  $Z_c$  koosneb juhi alalisvoolutakistusest, mis on leitav tootjakataloogidest, ning pinnaefektist. Arvutuste käigus ei ole viimasele tähelepanu pööratud, kuna 50 Hz võimsussagedusega liinide arvutustes on lubatud pinnaefekti arvestamata













Elektrilises ühenduses olevate juhtide grupeerimise tulemusena koosneb kontaktliini mudel kahest kontaktliinijuhist  $OC_{ekv1}$  ja  $OC_{ekv2}$ , kahest tagasivoolujuhist  $T_1$  ja  $T_2$ , kahest fiidriiinist  $F_1$  ja  $F_2$  ning kogu raudteeliinile ühisest maandusjuhist  $R_E$ . Täieliku mudeli koostamiseks leitakse kõikide juhtide vastastikused induktiivjuhtivused kasutades selleks avaldist (6.20).

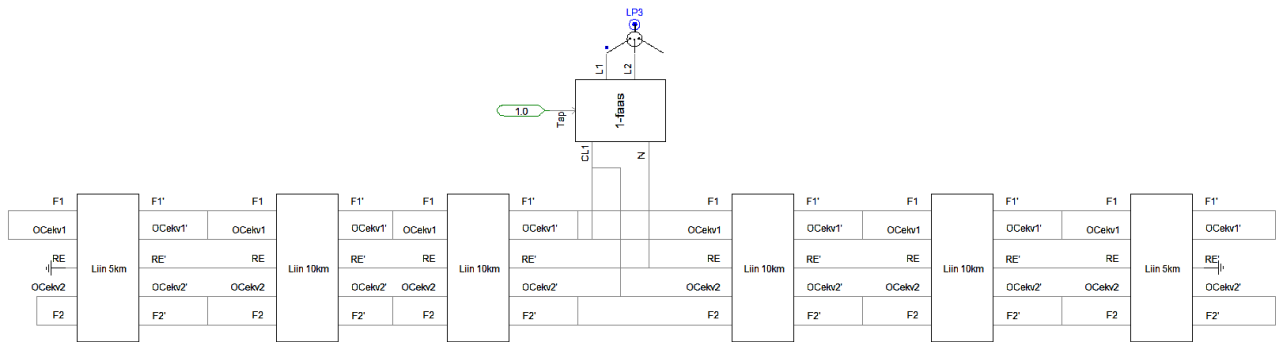
Lisaks takistuste arvutamisele kontaktliinis on vaja mudeli koostamisel arvestada ka mahtuvusi. Mahtuvusjuhtivuste arvutamisel on arvestatud, et eelnevalt leitud ekvivalentne juht  $R_E$  on oma iseloomult antud mudelis võrdväärne maapinnaga, kuna  $R_E$  sisaldab endas sama potentsiaaliga maaühenduses olevaid juhte. Sellest tulenevalt on mudelis juhi  $R_E$  vahelise mahtuvusjuhtivuse väärtuse saamisel teiste juhtidega ( $F$ ,  $T$  ja  $OC_{ekv}$ ) rakendatud avaldist (6.26). Kontaktliini mudelis omavahelise mahtuvusjuhtivuse arvestamisel juhi  $OC_{ekv}$  korral, on mahtuvusjuhtivuse väärtust arvestatud kahekordsena, kuna tegelikkuses sisaldab ekvivalentne juht endas kahte eraldi asetsevat juhti.

### 6.2.3 Kontaktvõrgu PSCAD mudeli koostamine

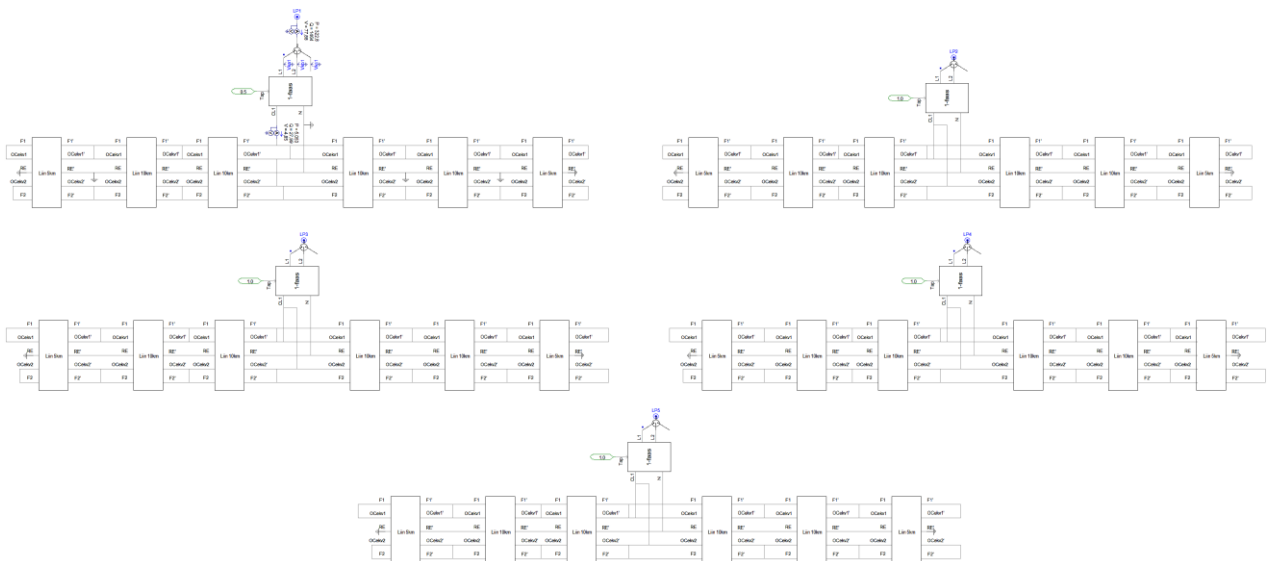
Eelnevas punktis (6.2.2) kirjeldatu ja arvutuste tulemuste põhjal on saadud PSCAD-is modelleerimiseks kontaktliini juhtidest ja nende vahelistest ühendustest koosnev mudel (Joonised 6.29–6.31), mis sisaldab kõiki juhte koos nende aktiivtakistuse ( $R$ ), induktiivjuhtivuste ( $X_i$ ,  $X_m$ ) ja mahtuvusjuhtivuse ( $C_m$ ) parameetritega. Avaldiste (6.19) – (6.29) põhjal saadud juhtide endi ja nende omavaheliste parameetrite väärtused. Arvutuste käigus on kontaktliini juhi takistuse komponente vaadeldud eraldi, kuna PSCAD-i mudelisse kantakse juhi aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvuslik komponent eraldi. Seega pole vajalik nende koondamine ühtseks näivtakistuseks  $Z$ . Avaldise (6.24) ja (6.25) eriliiki komponendid juhtide kohta on koondatud vastavalt komponendi iseloomule. Juhi aktiivtakistus  $R = R_i + \Delta R$  kilomeetri kohta koosneb liini aktiivtakistusest ja Carson'i parandustegurist  $\Delta R$ . Juhi induktiivjuhtivus  $X = X_i + \Delta X$  kilomeetri kohta koosneb juhi enda-induktiivsusest ja Carson'i parandustegurist  $\Delta X$ . Juhtide omavahelisteks parameetriteks mudelis on juhtide vahelised induktiivjuhtivused  $X = X_m + 2\Delta X$ , mis koosnevad juhi  $i$  ja  $j$  vahelisest induktiivsusest  $X_m$  ja kahekordsest parandustegurist  $\Delta X$  ning aktiivkomponentiks juhtide vahel on kahekordne parandustegur  $\Delta R$ . Lisaks juhtide vahel esinevale induktiivjuhtivusele ja aktiivkomponentile esineb nende vahel ka mahtuvusjuhtivuse komponent  $C$ . Mudeli koostamisel on juhtide komponendid PSCAD-i kantud tüüpiliste passiivelementidena. Aktiivtakistus tüüpilise takistusena ( $\Omega$ ), induktiivjuhtivus induktorina ( $H$ ) ja mahtuvusjuhtivus







Joonis 6.32. Modelleeritud 50 km pikkune kontaktvõrgu lõik koos toitetrafoga.



Joonis 6.33. Elektriraudtee kontaktliinide süsteemi mudel

## 6.3 Elektrirongide veosüsteemide modelleerimine

### 6.3.1 Mudelite kirjeldus

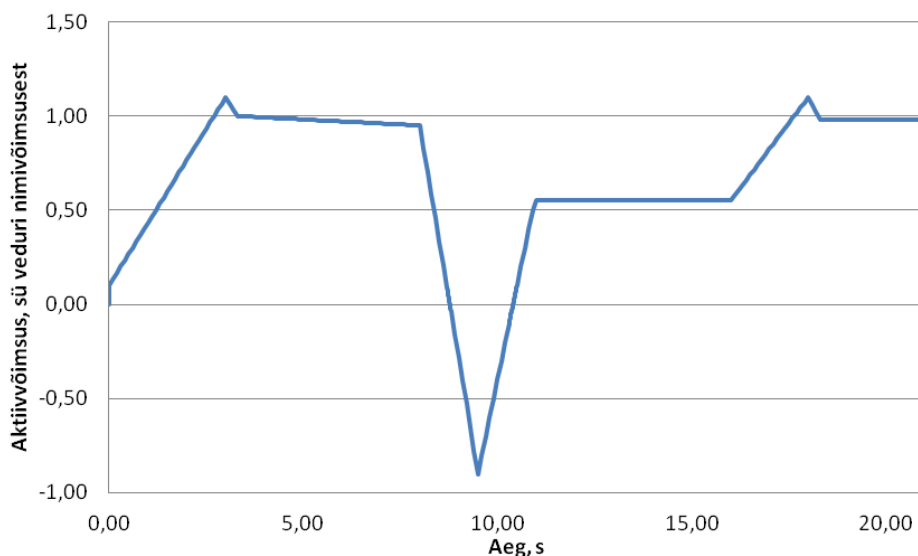
Elektriraudtee veduri *PSCAD* mudeli koostamisel on lähtutud varasemas peatükis (5.2) kirjeldatud kiirendus ja pidurdus karakteristikutest ning vedurite modelleerimise põhimõtetest. Veduri mudel on koostatud analüüsivaks elektriraudtee mõju olemasoleva elektrivõrgu talitlusele. Eeldatud on, et kõige olulisemad mõjud elektrisüsteemile saavad tekkida elektriraudtee veduri regeneratiivsest pidurdamisest ning tarbitava võimsuse laiaulatuslikus muutusest. Talitlusrežiimide uurimiseks on koostatud kaks eraldiseisvat mudeli varianti, millest esimesel juhul käsitletakse rongi kiirendus- ja pidurduskarakteristikuid ning teise juhul modelleeritakse veduri elektrienergia tarbimise muutust. Viimane kirjeldab olukorda, kus liini trassis esinevate pöörete tõttu tuleb ajutiselt vähendada rongi kiirust ning millele seejärel järgneb koormuse suurenemine kuni nimiparameetriteni.

Modelleerimiseks on koostatud käesoleva töö tingimustele sobivad veduri koormusgraafikud. Koormusgraafikute koostamisel on vähendatud veduri püsitalitluse ning lineaarselt kasvavaid-kahanevaid osasid, et kiirendada simulatsiooni protsessi ning vähendada mudeli mahtu. Iga modelleeritud režiimi kestvuseks on võetud 3...4 sekundit.

Mudeli koostamisel on valitud rongi nimiaktiivvõimsuseks  $P_n = 5$  MW, veduri koormusteguriks  $\cos \varphi = 0,85$  ja nimifaasipingeaks  $U_n = 25$  kV võrgusagedusel  $f = 50$  Hz. Antud parameetrid on kohaldatavad tüüpilisele reisirongile maksimaalkiirusega 220 km/h ning keskmisele kaubarongi vedurile.

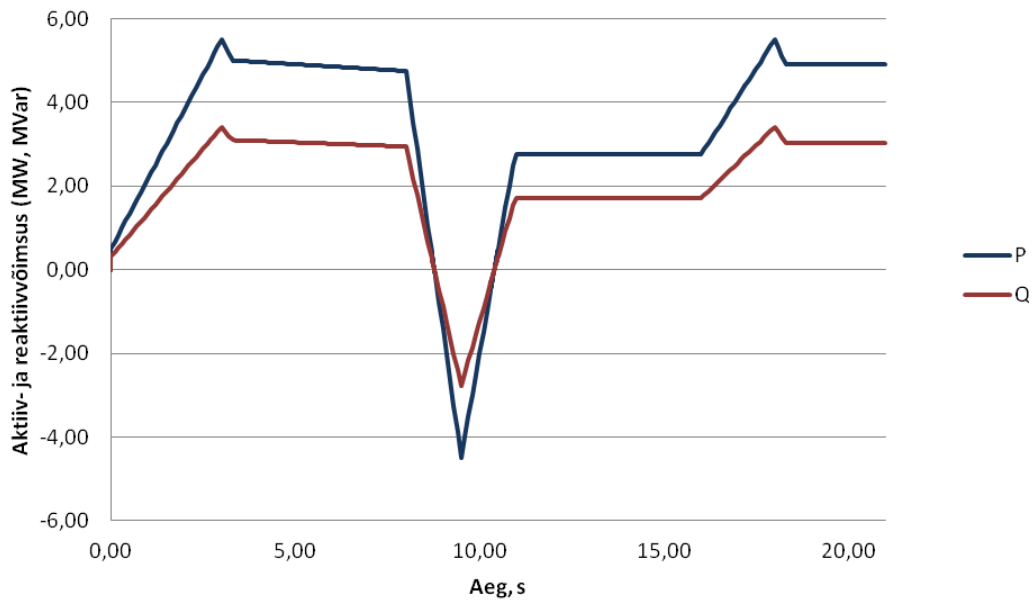
### Koormuskarakteristik regeneratiivsel pidurdamisel

Vastavalt peatükis 5 esitatud kiirendus- ja pidurduskarakteristikule (Joonis 5.10) on koostatud modelleeritava veduri kiirendus- ja regeneratiivse pidurduse graafik suhtühikutes, mis on toodud joonisel 6.34. Antud joonis kirjeldab mudeli käitumist 21 sekundi pikkuselise tsükliks, mis iseloomustab veduri ühte võimalikku vähendatud töötsükli. Vahemikus 0...3 sekundit toimub rongi kiirendamine selle maksimaalse kiiruse saavutamiseni, sel perioodil suureneb tarbitav aktiivvõimsus nimivõimsusest 10% suuremaks. Vahemikus 3...8 sekundini on tegemist stabiilse kiirusega, kus tarbitav võimsus langeb sujuvalt kuni 95% nimivõimsusest. Antud perioodile järgneb 2,5 sekundiline pidurdamine regeneratiivses režiimis ning seejärel järsk kiirendus 55% nimivõimsusest ja edasi kiirendamine 2 sekundi jooksul (16...18 sekundit), mis tõstab tarbitavat aktiivvõimust 1,1 korda veduri nimivõimsusest. Edasi järgneb stabiilne kulgemine koormusel 98% nimivõimsusest.



Joonis 6.34. Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamisega, suhtühikutes

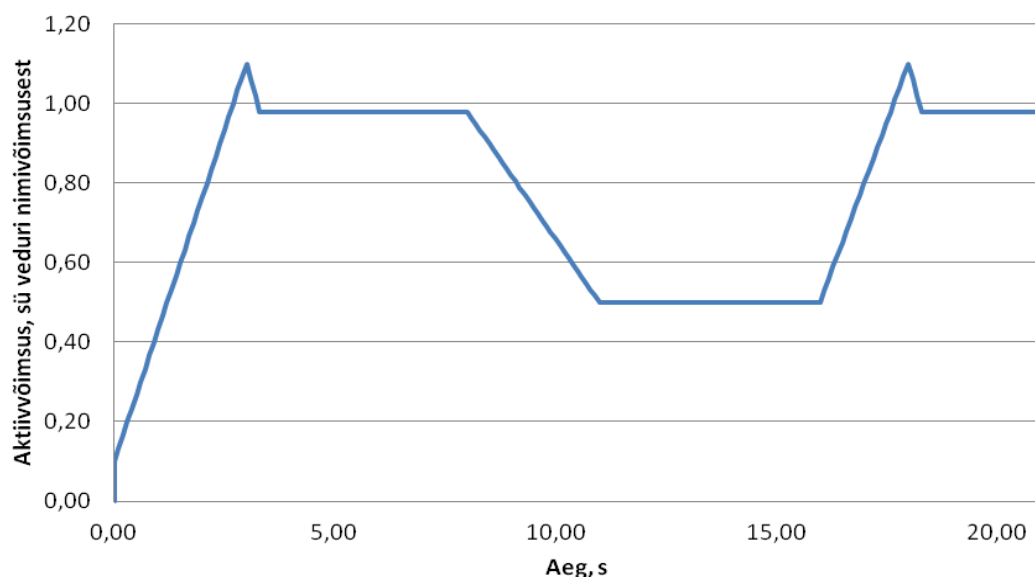
Võttes arvesse veduri nimivõimsust ning võimsustegurit on koostatud veduri koormusgraafik, mida kajastab joonis 6.35.



Joonis 6.35. Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamisega

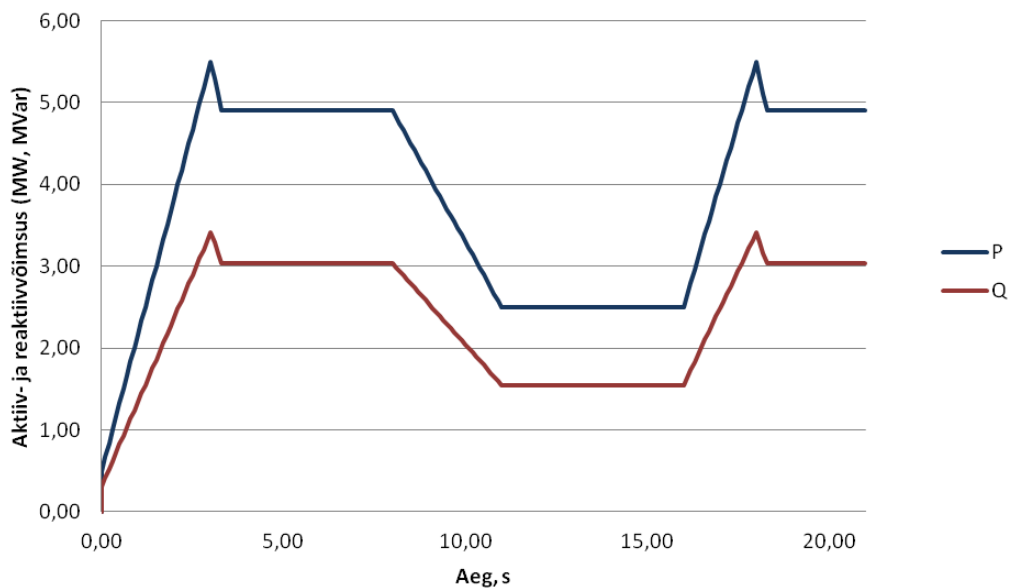
### Koormuskarakteristik regeneratiivse pidurdamiseta

Järgnevalt on koostatud veduri koormuskarakteristik ilma regeneratiivse pidurdamiseta. Mudel on vajalik hindamaks kogu elektrivõrgule avalduvaid mõjusid tulenevalt koormuse muutusest elektriraudteesüsteemi siseselt. Modelleerimiseks koostatud koormusgraafik on toodud joonisel 6.36.



Joonis 6.36. Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamiseta, suhtühikutes

Joonisel 6.36 on näha, et ajavahemikul 0...3 sekundini toimub veduri kiirendamine maksimaalse kiiruseni, mistõttu tekib 10%-line koormuse ülevõnge. Edasi toimub viie sekundiline kulgemine stabiilsel koormusel, millele järgneb lineaarne koormuse vähendamine 50% ulatuses nimivõimsusest tulenedes veduri pidurdamisel hõõrdejõu ja tuuletakistuse mõjust. Peale viie sekundilist stabiilset kulgemist järgneb kiirendamine maksimaalse kiiruseni ning edasine stabiilne kulgemine koormusel 98% nimivõimsusest. Võttes arvesse veduri nimivõimsust ning võimsustegurit on joonisel 6.37 koostatud veduri koormusgraafik.



Joonis 6.37. Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamiseta

### **PSCADi mudeli koostamine regeneratiivse pidurdamisega**

Käesoleva uurimistöös on vedurit käsitletud näivtakistuse mudelina, kuna see on kergesti käsitletav ning vajab minimaalsel arvul lähteandmeid. Juhitavatest  $R$  ja  $L$  elementidest koosnev koormusmudel on seadistatud selliselt, et parameetrite muutused kirjeldaksid võimalikult realistlikult veduri koormust. Teades veduri koormusgraafikut ning kiirendus- ja pidurduskarakteristikut on koostatud mudelit võimalik kohandada konkreetsele veduritüübile. *PSCAD* tarkvara eripäradest tulenevalt on veduri mudel jaotatud kaheks põhiosaks. Esimese korral tarbib vedur elektrienergiat kontaktvõrgust, sellisel juhul modelleeritakse tarbimist nii kiirendamisel kui ka pidurdamisel tingimusel, et tarbitav aktiivvõimsus on suurem kui genereeritav ( $P_{tar} > P_{gen}$ ). Teise osa korral modelleeritakse veduri regeneratiivset pidurdamist tingimusel, et veduri poolt genereeritav aktiivvõimsus on suurem tarbitavast ( $P_{gen} > P_{tar}$ ). Genereeritava võimsuse edastamisel kontaktvõrku tuleb voolu suund muuta vastupidiseks, selle saavutamiseks on modelleeritud ideaalallikas, mille nimipinge on kaks korda suurem kontaktvõrgu nimipingest ehk 50 kV,



asetatud koostatud mudeli otsa. Sellisel juhul tekitab ideaalallikas regeneratiivse mudeli terminalidel potentsiaalide erinevuse, mis on võrdne kontaktvõrgu nimipingega 25 kV.

Nii tarbimisel kui ka genereerimisel koosneb iga veduri mudel kahest juhitavast takistusest, aktiiv- ja induktiivtakistusest (Joonis 6.38). Induktiivtakistus avaldub läbi induktiivsuse.

#### *Joonis 6.38. Muutuvad takistid veduri mudelis*

Muutuvate takistite väärtuste juhtimiseks kasutatakse „*X-Y transfer function*“ blokki, mis oma olemuselt on *X-Y* koordinaatide tabel. *X* kajastab aega alates simulatsiooni algusest ning *Y* koordinaat on soovitatav väljundparameeter (antud juhul takistus). Blokisisene tabeli vorm võimaldab sisestada kuni maksimaalset 10 koordinaatide paari. Suurema hulga koordinaatide sisestamiseks on tarvis kasutada blokivälist andmefaili. Koordinaatide paari arv sõltub väljundparameetrigraafiku murdepunktidest ja soovitava tulemise täpsusest. Suurema täpsuse saavutamiseks on tarvis lisada täiendavad koordinaadid murdepunktides ja nullteljega ristumisel.

Antud töös koostatud mudelis on takistuse juhtimiseks kasutatud blokivälist andmebaasi. Andmefailid on koostatud eraldi, nii tarbiva ja genereeriva veduri mudelile kui ka aktiiv- ja induktiivtakistuste (*R*, *L*) jaoks. Andmefailide koostamisel on arvestatud *PSCAD* tarkvara sisestuskeelt ning piiranguid sisestatavatele väärtustele. Saadud väljundsignaalid edastatakse muutuva parameetritega takistustele. Joonis 6.39 kajastab veduri muutuva aktiivtakistuse signaali *R5MW* koostamise loogikaskeemi.

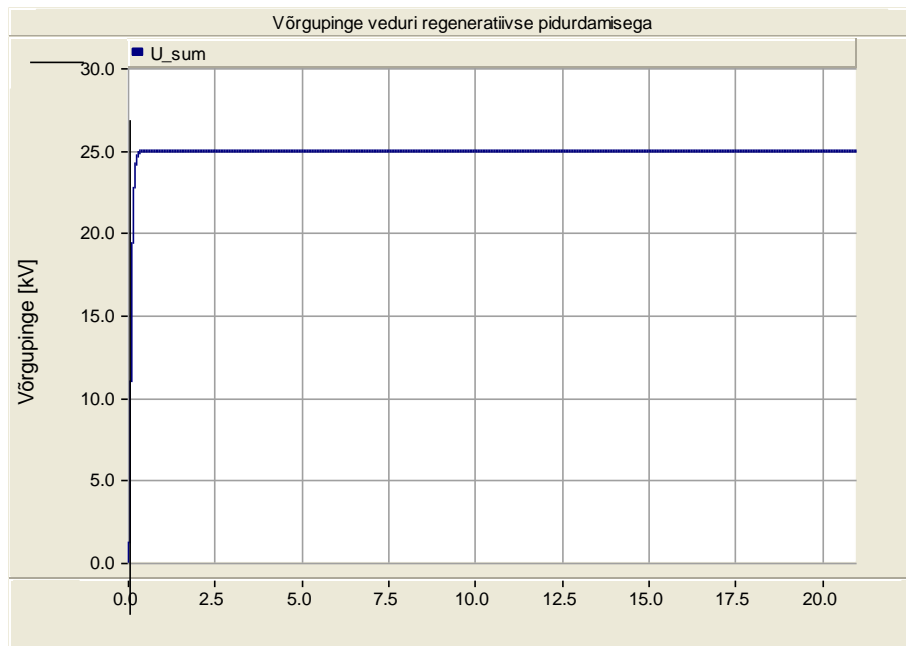






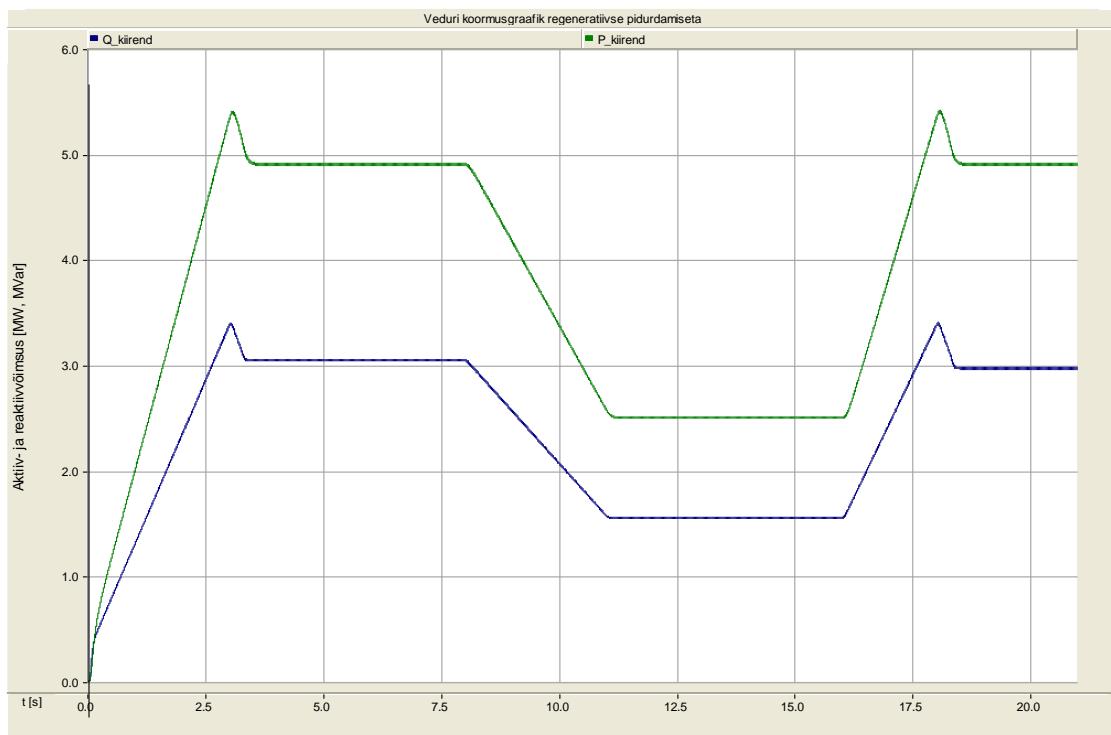






Joonis 6.47. Võrgupinge graafik regeneratiivse pidurdamisega veduri modelleerimisel

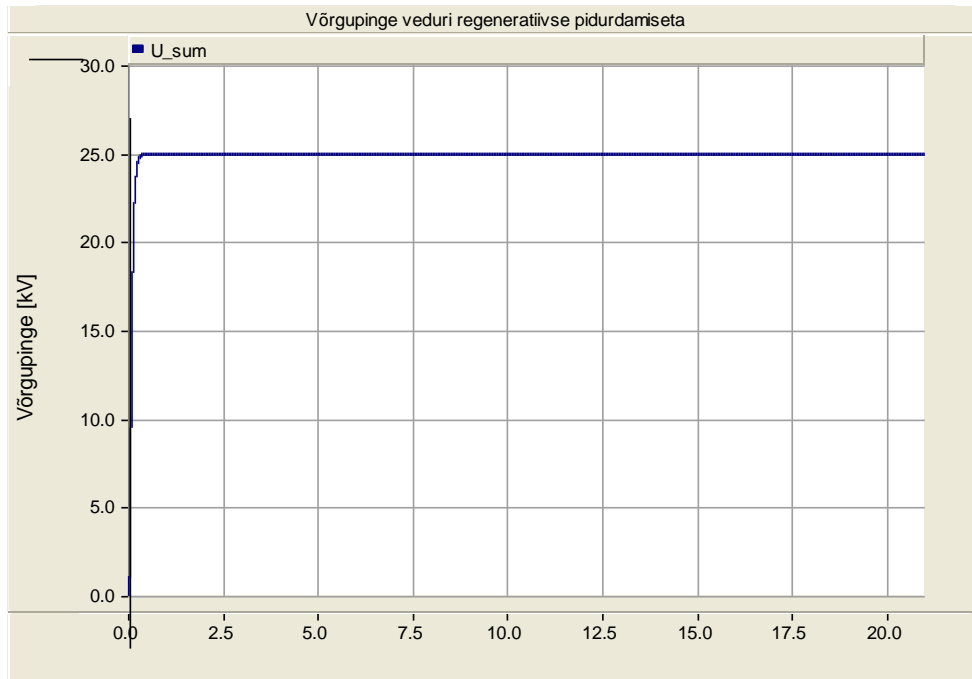
Joonisel 6.48 on näidatud regeneratiivse pidurdamiseta veduri modelleerimisel saadud koormusgraafik, mis on sarnane joonisel 6.36 aluseks võetud graafikuga.



Joonis 6.48. Koormusgraafik regeneratiivse pidurdamiseta veduri modelleerimisel

Joonisel 6.49 kajastub regeneratiivse pidurdamiseta veduri mudeli pingegraafik, kus peale mudeli rakendumist on pinge väärtus konstantne ning võrdeline kontaktvõrgu nimipingega. Antud

tulemus vastab ideaalsetele tingimustele, kuna tegemist on ideaalse toiteallikaga ning puuduvad teised mõjurid.

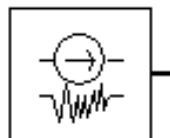


Joonis 6.49. Modelleeritud võrgupinge graafik veduri regeneratiivse pidurdamiseta

Modelleerimisel saadud koormus- ja pingegraafikud on sarnased modelleerimiseks kasutatud alusgraafikutega. Järeldusena saab väita, et veduri mudelid on korrektsed ning käituvad ideaaltingimustele ettenähtud viisil.

### Kõrgemate harmoonikute modelleerimine

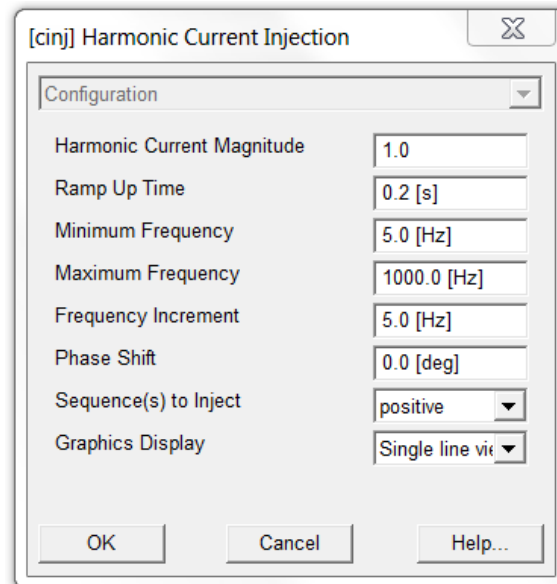
Kaasaegsetes vedurites kasutatakse kiiruse reguleerimiseks takistite asemel jõuelektroonika komponente, mis genereerivad kontaktvõrku kõrgemaid harmoonikud. Kõrgemate harmoonikute modelleerimiseks PSCAD tarkvaras kasutatakse "Multiple Harmonic Current Source" blokki (Joonis 6.50).



Joonis 6.50. "Multiple Harmonic Current Source" mudel tarkvaras PSCAD



"Multiple Harmonic Current Source" bloki kasutamine võimaldab valikuliselt PSCAD-i mudelisse tekitada olemasolevatele mõõteandmetele vastavaid harmoonikuid. Antud meetodi kasutamine lihtsustab harmoonikute mõjude ning nende levikuid käsitlevaid uurimistöid, kuna puudub vajadus harmoonikuid tekitava seadme või tarbija täielikuks modelleerimiseks.



Joonis 6.51. "Multiple Harmonic Current Source" konfiguratsiooni aken

Antud mudeli (Joonis 6.50) abil on kolmefaasilisse võrku võimalik sisestada ettemääratud sagedusega vooluharmonikuid. Mudeli seadistamisel (Joonis 6.51) tuleb sisestada järgmised läheteandmed:

- 1) vooluharmonikute amplituud kA;
- 2) rambi kestus s;
- 3) harmoonikute minimaalsed ja maksimaalsed sagedused Hz;
- 4) harmoonikute sageduste juurdekasv Hz;
- 5) faasinihe °;
- 6) järgnevus (positiivne-, negatiivne- ja nulljärgnevus).

Harmonikute sisestamise tulemuste analüüsimiseks kasutatakse moodul „On-Line Frequency Scanner (FFT)“, mis on toodud joonisel 6.52.

*Joonis 6.53. Veduri mudeli skeem koos harmoonikute allikaga*

## **6.4 Kokkuvõte**

Antud peatükk koondab enda alla käesoleva uurimustöö modelleerimisülesanded, kirjeldades ja andes ülevaate mudelite koostamisest *PSCAD* tarkvaras nii ülekandevõrgule, kontaktliinile ja selle elementidel kui ka elektrirongidele.

Praktikast ja elektriraudtee iseloomulikest karakteristikutest tulenevalt toidetakse elektriraudtee kontaktvõrku kõrgeimalt võimalikult pingestmelt. Eestis vastab Rail Balticu avaldatud trassivariantidele lähimaks kõrgeimaks 110 kV pingestmega ülekandevõrk. Analüüsimaks elektriraudtee võimalikke mõjusid Eesti elektrisüsteemile on Rail Balticu trassivariantide lähedast 110 kV elektrivõrgu osa modelleeritud *PSCAD* tarkvaras, kusjuures ülejäänud elektrivõrk on ekvivalenteeritud ja modelleeritud süsteemi äärepunktidesse, seega ei hõlma modelleerimine 330 kV ülekandevõrku ning Ida ja Lõuna-Eesti 110 kV elektrivõrku. 110 kV ülekandevõrgu

mudeli sisaldab endas nii ülekandeliine, trafosid, jaotusvõrgu koormusi kui ka kondensaatorpatareisid. Peatükis on kirjeldatud 110 kV ülekandevõrgu ekvivalentide modelleerimist *PSCAD* tarkvaras. Elektrivõrgu ekvivalentpunktideks on valitud alajaamad ning nende lattidele on arvatud ekvivalentse päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistused. Elektriraudtee mõjude täpseks analüüsimiseks on oluline saavutada Elering AS-i lähteandmetena esitatud püsitalitlusele sarnane lähtepunkt, selleks kasutatakse mudeli ekvivalentsete pingesallikate täppisseadistamist.

Elektrivõrgu õhuliinide modelleerimisel on lähtutud Elering AS poolt edastatud andmetest ning arvestatud on liinide geometriat ning maapinna ligilähedast eritakistust. Lühemad õhuliinid on konverteeritud eriliseks ekvivalentseks *PI* sektsiooniks. Antud juhul on tegemist küll lihtsustusega, kuid see ei avalda mõju ülekandevõrgu mudeli täpsusele. Kaabelliinide modelleerimisel on arvestatud induktiivseid ja mahtuvuslike sidestusi faaside vahel, mis oluliselt suuremad võrreldes õhuliinidega. Tulenevalt nulljärgnevustakistuste parameetrite määramise keerukusest on kasutatud estimateerimise funktsiooni, mis tekitab küll teatavat ebatäpsust, kuid kaabelliinide lühikese kogupikkuse juures ei mõjuta see ülejäänud elektrivõrgu mudeli täpsust.

Trafode modelleerimisel *PSCAD* tarkvaras on kasutatud kolmefaasilisi standardtrafo mudeleid. Trafod on antud elektrivõrgu mudelis täiendavaks osaks, hindamaks elektriraudtee võimalike mõjude edasikandumist ja ulatus ülekandevõrgust jaotusvõrku. Lihtsustuse mõttes on loobutud magnetimisahela modelleerimisest ning pingestme regulaatorist.

Elektrivõrgu koormusmudelite koostamiseks on kasutatud Elering AS poolt saadud *PSCAD* tarkvara täiendavat liidest *E-TRAN*. *E-TRAN*-i koormusmudelid on stabiilsed ja kergemini seadistatavad. Ülekandevõrgu koormuste modelleerimisel on lähteandmetena kasutatud Elering AS-st saadud maksimum koormusstsenaariumeid 2020 ja 2030 aastaks.

Suur osa antud peatükist keskendub keeruka kontaktvõrgu modelleerimisele. Eraldi on vaadeldud raudtee veotrafode mudelite koostamist, kuna kontaktvõrgus rakendatavad raudteetrafo mõjutavad nii rongile edastatava veojõu efektiivsust kui ka ühefaasilisest koormusest tulenevate probleemide kandumise ulatust 3-faasilisse ülekandevõrku. Koostatud on mudelid raudteevõrgus enam kasutatust leidvatele veoalajaamade trafodele. Eraldi on välja toodud 1-faasilise, auto-, *Scott*- ja V-ühendusega trafo ühendusskeemid veojõusüsteemis ning matemaatilised ja *PSCAD* tarkvaras koostatud mudelid.

Kontaktvõrgu modelleerimine osutub keerulise ülesandeks, kuna õhuliinidest koosnev kontaktliini süsteem sisaldab palju paralleelseid juhte, mis omavad erinevaid potentsiaale, vahemaid ja ristlõiked. Mudeli koostamisel on lähtutud sümmeetrilisest kahe rööppaariga

raudteeliinist, mille kontaktvõrk koosneb fiidri- ehk abitoiteliinist, kontaktõhuliini-, kande-, maandus- ja tagasivoolu juhist ning lisaks relssidest. Juhtide valimisel ja parameetrite määramisel on lähtutud maailmas laialt rakendatavatest lahendustest ja tootjakataloogidest saadud andmetest. Mudeli koostamisel on arvestatud lisaks juhtide aktiivtakistustele ka juhtide omavahelisi ning juhi ja maa vahel esinevaid induktiivseid ja mahtuvuslike sidestusi. Kontaktliini takistuste arvutamisel on rakendatud *Carson*'i meetodit, mis käsitleb laine levikut paralleelselt maapinnaga asetsevates liinides arvestades naaberliinide induktiivset ja mahtuvuslikku mõju ja juhtide geomeetrilist paiknemist liinil. Kuna kontaktliinis on omavahel elektriliselt ühendatud kontaktliini- ja kandejuhe ning relsipaarid ja maandusjuht kogu raudteeliini ulatuses, siis on mudeli lihtsustamise mõttes need juhid omavahel ekvivalenteeritud. Seega on koostatud lihtsustatud mudel vastavalt ekvivalentsetele kontakt- ja kandejuhtmele ning ekvivalentsetele rööpapaaridele ja maandusjuhtmele. Juhtide ekvivalenteerimist kontaktliinis on illustreeritud ülevaatlilike joonistega. *PSCAD* tarkvaras koostatud kontaktvõrgu mudel koosneb kõikidest kontaktliini juhtidest ja nende vahelistest ühendustest, sisaldades kõikide juhtide ning nende vahelisi aktiivtakistusi, induktiivjuhtivusi ja mahtuvusjuhtivusi. Kontaktvõrgu mudel on koostatud moodulitena vastavalt liinipikkustele 5 ja 10 km, et lihtsustada mudeli komplekteerimist vastavalt kontaktvõrgu liini pikkusele. Tulenevalt planeeritavast 229 km Rail Baltic raudteeliini pikkuses on käesoleva projekti tarbeks modelleeritud elektriraudtee kontaktvõrku kogupikkusega 250 km. Kontaktvõrgu modelleerimisel on lähtutud kesktoitega süsteemi põhimõttest, mille puhul on iga 50 km kontaktliini keskpunkti ühendatud toitepunkt. Iga 50 km pikkune kontaktvõrk on omaette üksus ning pole normaalühenduses kokku ühendatud, kuna see tekitaks täiendavaid pingelangusid. Lahendus on oma ülesehituselt universaalne ning praeguseks projekti etapiks piisavalt täpne. Rail Balticu projekti edasise arengu korral tuleb antud lahendust täpsustada ning vajadusel kontaktliinide moodulite omavahelised ühendused ringi ühendada.

Elektriraudtee veduri *PSCAD* mudeli koostamisel on lähtutud kiirendus- ja pidurduskarakteristikutest ning vedurite modelleerimise põhimõtetest. Veduri mudel on koostatud analüüsimaks elektriraudtee mõju olemasoleva elektrivõrgu talitlusele eeldusel, et kõige olulisemad mõjud elektrisüsteemile saavad tekkida elektriraudtee veduri regeneratiivsest pidurdamisest ning tarbitava võimsuse laiaulatuslikus muutusest. Eraldi on koostatud mudelid rongi kiirendus- ja pidurduskarakteristikuile ning veduri elektrienergia tarbimise muutusele. Modelleerimiseks on koostatud veduri koormusgraafikud, kus simulatsiooniprotsessi kiirendamiseks ja mudeli mahu vähendamiseks, on vähendatud veduri püsitalitluse ning lineaarselt kasvavaid-kahanevaid osasid. Peatükis on esitatud veduri koormuskarakteristikud ning kirjeldatud on mudeli käitumist

nii regeneratiivse pidurdusega kui pidurduseta olukorras. Uurimustöös on vedurit käsitletud näivtakistuse mudelina, kuna see on kergesti käsitletav ning vajab minimaalsel arvul lähteandmeid. Juhitavatest  $R$  ja  $L$  elementidest koosnev koormusmudel on seadistatud nii, et parameetrite muutused kirjeldaksid võimalikult realistlikult veduri koormust. *PSCAD* tarkvara eripäradest tulenevalt on veduri mudel jaotatud kaheks põhiosaks, kus esimesel juhul tarbib vedur elektrienergiat kontaktvõrgust, sellisel juhul modelleeritakse tarbimist nii kiirendamisel kui ka pidurdamisel. Teise osa korral modelleeritakse veduri regeneratiivset pidurdamist tingimusel, et veduri poolt genereeritav aktiivvõimsus on suurem tarbitavast. Nii tarbimisel kui ka genereerimisel koosneb iga veduri mudel kahest juhitud takistusest, aktiiv- ja induktiivtakistusest. Sarnaselt regeneratiivse pidurdamisega mudelile on koostatud *PSCAD* mudel ka regeneratiivse pidurdamiseta vedurile. Antud peatükis ära toodu ülevaade ka vajalike parameetrite arvutamisest mudeli koostamiseks *PSCAD* tarkvaras. Lisaks eelnevale on uurimustöö käigus vedurile koostatud ka juhtivad mudelid. Antud mudel on mahukas ja võtab arvutamisel palju ressursi, kuna suurused arvutatakse välja iga arvutussammu jaoks. Seega ei ole juhtvat mudelit kasutatud veduri modelleerimisel uurimaks selle mõjusid elektrivõrgu talitlusele ning seda rakendatakse ainult täiendavate vedurimudelite valideerimise vajadusel.

Uurimustöö käigus *PSCAD* tarkvaras koostatud veduri mudelite hindamiseks on saadud koormus- ja pingegraafikuid analüüsitud ideaalsetel tingimustel. Modelleerimisel saadud on sarnased aluseks võetud graafikutega, seega võib järeldusena väita, et veduri mudelid on korrektsed. Kontaktvõrgus tekitavad probleeme kõrgemad harmoonikud, mida tekitavad kaasaegsetes vedurites kasutusel olevad jõuelektronika komponendid. Veduri poolt võrku edastavate harmoonikute hindamiseks on veduri mudelile *PSCAD* tarkvaras lisatud harmoonikute modelleerimist võimaldav blokk, mille abil saab mõõta nii nimisageduse kui ka kõigi selle harmoonikute päri- vastu- ja nulljärgnevuskomponendi amplituudväärtusi ning nende faasinihkenurkasid.

## **6.5 Kirjandus**

- [1] Hill, R. J., Electric railway traction. Part 3 Traction power supplies. IEE Power Engineering Journal, Vol.8, No. 6, December 1994, pp. 275-286.
- [2] Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Schneider, E. Contact Lines for Electric Railways. Erlangen, Publicis Publishing, 2009/2012, 994
- [3] Senol, I., Görgün H., Gürkan Aydeniz, M. General comparison of the electrical transportation systems that are fed with 1x25 kV or 2x25 kV and expectations from these systems.

- 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 1998, Tel-Aviv, 18-20 May 1998, Vol.2, pp. 885-887.
- [4] Zhengqing, H., Yuge, Z., Shuping, L., Shibin, G. Modeling and Simulation for Traction Power Supply System of High-Speed Railway. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Wuhan, 25-28 March 2011, pp. 1-4.
- [5] Cella, R., Giangaspero, G., Mariscotti, A., Montepagano, A., Pozzobon, P., Ruscelli, M., Vanti, M. Measurement of AT Electric Railway System Currents at Power-Supply Frequency and Validation of a Multiconductor Transmission-Line Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1721-1726.
- [6] Lai, H., Zhu, X., Yu, J. Design and Realization of the Economical Operation Monitoring System for Traction Transformers. ICAL '09. IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2009, Shenyang, 5-7 August 2009, pp. 409-413.
- [7] Kalantari, M., Sadeghi, M. J., Fazel, S.S., Farshad, S. Investigation of Power Factor Behavior in AC Railway System Based on Special Traction Transformers. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Vol.2, No.11, November 2010, pp. 618-626.
- [8] Lee, H., Kim, G., Lee, C., Oh, S., Park, S. Analysis of Voltage Unbalance on Korean Railway System.
- [9] Dolara, A., Gualdoni, M., Leva, S. Effect of primary High Voltage supply lines on the High Speed AC Railways Systems. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2010, Bergamo, 26-29 September 2010, pp. 1-8.
- [10] Guihua, H., Weirong, C., Yankun, L., Yang, Z. Simulation of traction transformer based on PSCAD/EMTDC. IEEE Power Engineering and Automation Conference, PEAM 2011, Wuhan, 8-9 September 2011, pp. 132-135.
- [11] Yu, H., Yue, Y., Zhe, C., Zhifei, C., Ye, T. Research on the Selection of Railway Traction Transformer. 2010 Conference Proceedings IPEC, Singapore, 27-29 October 2010, pp. 677-681.
- [12] Chen, T. Simplified Models of Electric Railway Substations for Three-phase Power-Flow Studies, Conference Record of the 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver CO, 2-6 October 1994, pp. 2245-2248.
- [13] Oura, Y., Mochinaga, Y., Nagasawa, H. Railway Electric Power Feeding System. *Railway Technology Today 3*. Japan Railway & Transport Review, June 1998, pp. 48-58.
- [14] Ross, B. A Survey of Western European AC Electrified Railway Supply Substation and Catenary System Techniques and Standards. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, Vol. IGA-7, No. 5, September 1971, pp. 666-672.

- [15] Abdulaziz, I.M. Mathematical Modelling and Computer Simulations of Induced Voltage Calculations in AC Electric Traction. Doctor of Philosophy thesis. Edinburg, Napier University, April 2003, 180 pp.
- [16] AS Draka Keila kaabel tootekataloog.
- [17] Siemens. Product Catalog 2010. Contact line equipment for mass transit and main line railways. 810 pp.
- [18] Lee, H., Lee, C., Jang, G., Kwon, S. Harmonic Analysis of the Korean High-Speed Railway Using the Eight-Port Representation Model. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, April 2006, pp. 979-986.
- [19] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., Ambriz-Pérez, H., Angeles-Camacho, C. FACTS Modelling and Simulation in Power Networks. England, John Wiley & Sons Ltd, 2004, 403 pp.
- [20] Carson, J.R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. The Bell System Technical Journal. Vol. 5, 1926, pp. 539-554.
- [21] Theethayi, N. Electromagnetic Interference in Distributed Outdoor Electrical Systems, with an Emphasis on Lightning Integration with Electrified Railway Network. Uppsala, Uppsala University, 2005, 206 pp.
- [22] Sanz-Bobi, J.D., Carsón-Núñez, J., Loiero, R., Féliz, J. Electrical Disturbances from High Speed Railway Environment to Existing Services. Electrical Generation and Distribution Systems and Power Quality Disturbances, November 2011, pp. 161-182.

## **7. Elektriraudtee mõjude hinnang 110 kV ülekandevõrgule**

Käesolev peatükk koondab enda alla antud uurimustööks koostatud materjalide ja mudelite põhjal teostatud elektriraudteest tingitud mõjude hinnangut 110 kV ülekandevõrgule. Peatükk 7.1 määratleb ja analüüsib elektriraudtee liitumispunktideks sobivad alajaamad, lähtudes nii raudteetrassi ja alajaamade geograafilisest paiknemisest, esmasest pingeasümmeetria analüüsist kui ka elektriliinide ülekandevõimsusest. Peatükis 7.2 keskendutakse elektriraudtee talitlusest tingitud võimsusvoogude muutumisele ning sõlmalajaamade latipingete muutustele. Antakse ülevaade koostatud analüüsi stsenaariumitest ning selgitatakse saadud tulemusi ning nende olulisust. Antud peatüki viimane osa 7.3 kirjeldab pingeasümmeetria analüüsiks koostatud stsenaariumeid ning esitatakse saadud tulemuste analüüsi põhjal lõplik hinnang potentsiaalsetele liitumispunktidele.

### **7.1 Liitumispunktideks sobivate alajaamade määramine**

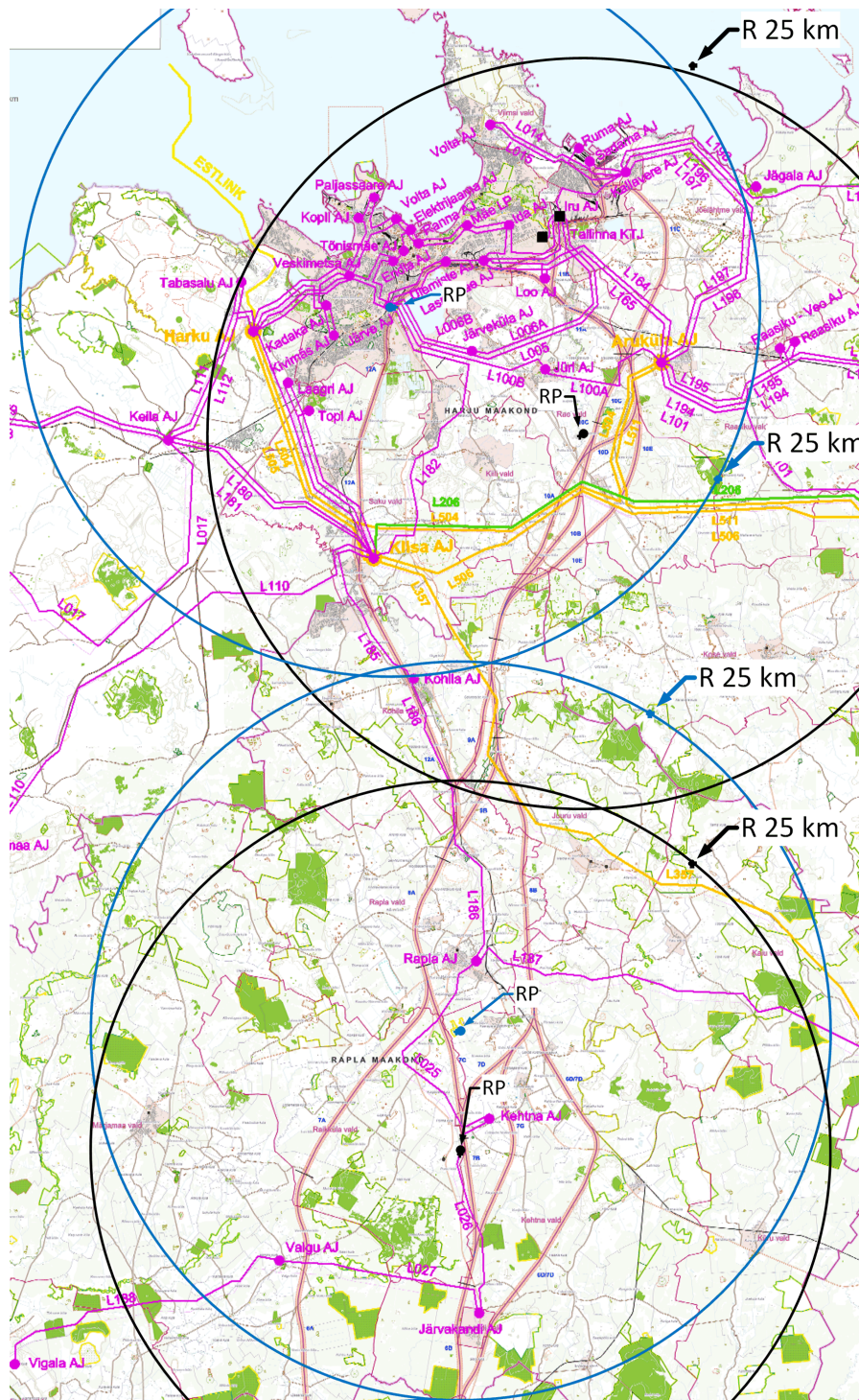
Elektriraudtee süsteemile sobivate liitumispunktide määramine on käesolevas uurimistöös olulise tähtsusega. Vastavalt avaldatud Rail Balticu trassivariantidele, on võimalike liitumispunktide valiku määramisel lähtutud elektriraudtee trassile lähemal paiknevatest alajaamadest. Ühtlasi on võimalike liitumispunktiks sobilike alajaamade analüüsi teostamisel lähtutud N-1 varustuskindluse kriteeriumi täitmisest ja sisenevate liinide arvust, milleks võib minimaalselt olla kaks toiteliini. Esmaste hinnangute tegemiseks alajaama sobivuse kohta, ilma põhjalikumaid elektrivõrgu parameetreid omamata, tuleb analüüsimisele alajaama lattide maksimaalne ja minimaalne lühisvõimsus. Üldistatult võib järeldada, et mida suurem on lühisvõimsus, seda väiksem on elektriraudtee süsteemi mõju tõenäosus elektrisüsteemile ning analoogselt, mida väiksem on lühisvõimsus, seda suuremad on elektriraudtee mõjud elektrisüsteemile.

#### **7.1.1 Geograafiline analüüs**

Tulenevalt Rail Balticu käimasolevatest projekteerimistöödest eelprojekti staadiumis on avaldatud mitmeid võimalikke trassivariante raudteeliini lõikudes. Esitatud variantide seas ei ole välja kujunenud kindlat eelistatuimat lahendust, mis võimaldaks läbi viia detailsema analüüsi. Arvesse on võetud kõiki antud uurimustöö läbiviimise ajaks avalikustatud trassilõike. Tulenevalt elektriraudtee trassilõikude varieeruvusest ja võimalikust hilisemast muutmisest, saab teha vaid teoreetilisi üldistusi alajaamade valikul ning uurimustöös tehtud valikud ei pruugi olla optimaalsed lõplikule lahendusel. Liitumispunktide määramisel on aluseks võetud avalikustatud koondkaart, kuhu on lisatud Eesti 110 ja 330 kV ülekandevõrgu skeem. Antud koondplaan Rail



Balticu trassivariantidele on osadena esitatud joonistel 7.1 ja 7.2. Terviklik ning suuremas mõõtkavas kaart on esitatud uurimistöö lisades.



Joonis 7.1. Rail Balticu trassi Põhja- ja Kesk-Eesti osa koondplaan

Joonis 7.1 kajastab Tallinnas ja Harjumaal kahte peamist välja pakutud trassi suunda, lõigul 12A<sup>1</sup> ja kombinatsioon trassidest lõigul 9A-11C. Nendel trassivariantidel on määrav roll kogu elektriraudtee süsteemile sobilike liitumispunktide valikul. Võttes arvesse elektrivõrgu konfiguratsiooni kujunevad liitumispunktide valikul välja kaks peamist lahendust. Joonistele 7.1 ning 7.2 on kantud 25 km raadiusega ringjooned, mis lihtsustavad ja illustreerivad liitumispunktide määramist. Ringjoone keskpunktid (joonisel tähistatud *RP*) iseloomustavad teoreetiliselt liitumispunkte, mis toidavad kontaktvõrku kogupikkusega 50 km. Liitumispunktide sobivaimad asukohad on ringjoone keskpunktide vahetus läheduses, mille korral kaetakse enim võimalikke trassivariante. Joonistel 7.1 ja 7.2 sinisega tähistatud ringjooned kujutavad võimalikku lahendust trassivariandi 12A korral ning mustaga tähistatud ringjooned iseloomustavad alternatiivset lahendust trassivariandile 9A-11C.

Lähtudes trassi paiknemisest suunal 12A asuvad raudteeliini vahetus läheduses Kallavere, Iru, Lasnamäe, Ülemiste, Järve ning Kiisa alajaamad. Arvestades elektriraudtee koormuse olemust ja elektrivõrgu konfiguratsiooni, on potentsiaalseteks liitumispunktideks ja edasiseks analüüsimiseks valitud Iru, Järve ja Kiisa alajaamad. Parameetrite poolest osutub sobilikuks liitumispunktiks ka Lasnamäe alajaam, kuid praegusest uurimistööst on antud alajaam kõrvale jäetud. Seda seetõttu, et alternatiivne Iru alajaam on oma asukohalt sobivam kõigi avalikustatud trassivariantide korral.

Lähtudes raudteeliini paiknemisest lõikudel 9A-11C asuvad trassi vahetus läheduses Kallavere, Iru, Loo, Lasnamäe, Jüri ja Aruküla alajaamad. Täiendavalt on võimalikeks liitumispunktideks ning edasiseks analüüsimiseks valitud veel Jüri ja Aruküla alajaamad, mis jäävad ringjoone keskpunkti lähedusse. Jüri alajaam kuulub antud valikusse, kuna õhuliini L100A ristub raudteetrassiga, mistõttu võiks teoreetiliselt antud õhuliinile ehitada täiendava liitumispunkti.

Edasise vaatluse alla tulevad Rail Balticu trassilõigud 8A-6A, 8A-6B ja 8B-6B. Jooniselt 7.1 on näha, et tegemist on ühe keerukama piirkonnaga kogu planeeritava elektriraudteeliini ulatuses, kuna esineb probleeme elektritoite tagamisel. Olukorra teeb raskeks alajaamade hõre paiknemine ning nende elektriline kaugus olulistest sõlmalajaamadest. Antud lõikudest on kõige probleemsem 8A-6A, mille planeeringujärgne suund on teistest variantidest erinev ning asukoht kaugemal. Antud trassilõigul paikneb Valgu 110 kV alajaam, kuid selle asukoht on lähimast

---

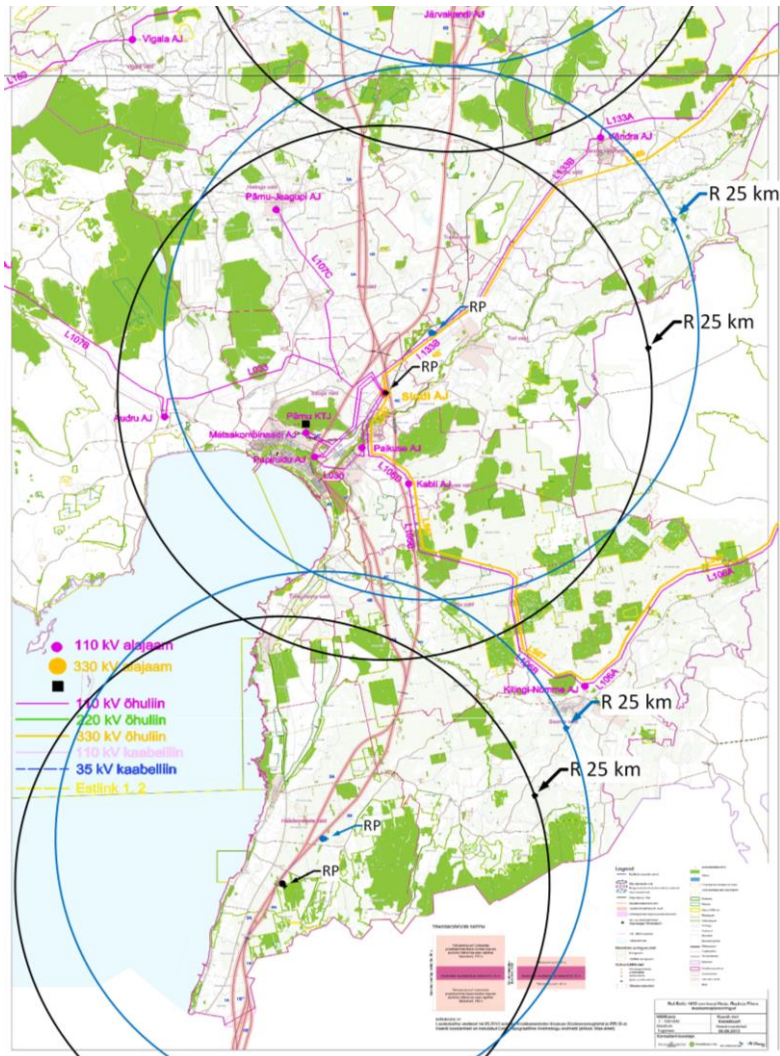
<sup>1</sup> Uurimistöös lähtutud Rail Balticu võimalike trassilõikude ametlikest tähistest, millega on trass jagatud lõikudeks 1A-12A.

põhjapoolsest toitealajaamast kaugel ning seega ei osutu Valgu alajaam sobivaks liitumispunktiks. Lisaks võib eeldada, et kuna Valgu alajaama toidetakse mööda pikka ülekandeliinide ringi, siis selle elektriline tugevus ei ole samuti liitumispunktiks sobimisel piisav. Juhul, kui kõne all olev raudteeliinilõik läheb realiseerimisele, tuleb toite tagamiseks luua uus liitumispunkt koos õhuliinidega. Üheks lahenduseks on luua täiendav liitumispunkt olemasolevale liinile L025, mis kulgeb antud raudtee liinilõigu läheduses. Sellest tulenevalt osutub vajalikuks analüüsida Kehtna alajaama sobivust elektriraudtee kontaktvõrgu liitumispunktiks, kuna Kehtna alajaama toidetakse kõne all oleva liini L025 kaudu.

Trassilõigud 8A-6B ja 8B-6B paiknevad teineteisele lähestikku ning on elektrivarustuse seisukohalt parema asukohaga, võrreldes eelnevalt kirjeldatud lõiguga 8A-6A. Trassilõikude 8A-6B ja 8B-6B läheduses asuvatest alajaamadest on elektriliselt tugevaim Rapla alajaam, saades oma toite kolmest punktist, millest kahe puhul on tegemist ühendustega elektriliselt tugevatesse Kiisa ja Paide sõlmalajaamadesse. Rapla alajaamale raudteeliini trassivariantide mõlema lahenduse (sinine ja must ringjoon) ringjoone keskpunkti läheduses paiknevad Kehtna ja Järvakandi alajaamad. Seega osutuksid antud alajaamad trassilõikude kontaktvõrgu toitmiseks justkui optimaalseteks. Paraku on elektrivõrgu seisukohast Kehtna ja Järvakandi alajaamad osaks pikast ülekandeliiniringist ning seega ei pruugi nende elektriline tugevus olla piisav sobimaks liitumispunktideks. Elektriraudtee trassilõikude läheduses paiknevatest alajaamadest on edaspidiseks analüüsimiseks valitud Rapla, Kehtna ja Järvakandi alajaamad.

Jooniselt 7.2 on näha, et Edela-Eestis on liitumispunktide määramiseks võrreldes Harju- ja Raplamaaga oluliselt erinevad tingimused. Pärnumaa piirkonnas on avalikustatud raudteeliini trassivariandid selgemalt määratletud. Keerukamaks kujuneb Pärnu linna ümbrus ja linna sisene mine, mille puhul on välja pakutud mitmeid alternatiivseid variante, kuna aga kõik trassivariandid jäävad ühte toitepiirkonda ning samade sõlmalajaamade lähedusse, siis ei valmista alternatiivsed trassivariandid elektrivõrgu seisukohalt probleeme. Sarnaselt joonisele 7.1 on ka joonisel 7.2 optimaalsed liitumispunktid illustreeritud ringjoonte keskpunktidega. Jooniselt 7.2 kajastub, et võimalikud lahendused koonduvad Sindi alajaama lähedusse. Esmapilgul paistab antud asukoht liitumispunktiks igati sobilik olema. Linna läbiva trassilõigu 4D lähedusse jäävad Metsakombinaadi ning Papiniidu alajaamad on lähtudes elektriühendustest sobivateks liitumispunktide valikuteks. Siinjuures on veel oluline märkida, et Papiniidu alajaam asub planeeritud raudteetrassi vahetus läheduses ning omab kahte ühendust Sindi alajaamaga ja lisahendust

Vändra alajaamaga, mis on kolmandaks sõltumatuks toiteallikaks Papiniidu alajaamale. Analüüsimaiks raudteeliinilõikude 5A-4A ning 5C-4G liitumispunkte on edasiseks vaatluseks valitud Sindi, Metsakombinaadi ning Papiniidu alajaamad.



Joonis 7.2. Rail Balticu trassi Edela-Eesti osa koondplaan

Joonisel 7.2 kajastub, et Pärnust lõunapool alates liinilõigust 4A kuni 1A, puuduvad võimalused elektriraudteele elektritoite tagamiseks. Selles piirkonnas puuduvad ülekandevõrk ja sõlmajaamad. Kõige lähim alajaam antud lõigule on Kilingi-Nõmme, mis jääb aga välja mõlema trassivariandi ringjoone keskpunktist (Joonis 7.2). Seega pole Kilingi-Nõmme alajaam raudteeliini trassilõigu toitmiseks sobiv, kuid kuna tegemist on kõige lähima alajaamaga, siis on see valitud edaspidiseks analüüsimiseks. Antud liinilõik 4A-1A osutub kogu vaadeldava Rail Balticu trassist kõige suuremaks väljakutseks, kuhu on elektrivarustuse tagamiseks paratamatu tar-



vis luua uus liitumisalajaam. Üheks variandiks on probleemi lahendamine kui osana regionaalsest elektrivarustusest, millega luuakse uus piirkonda toitev kolmefaasiline sõlmalajaam, kust lisaks elektriraudteele saaks toita ka teisi võimalikke tarbijaid antud piirkonnas. Lähenedes probleemile ainuüksi elektriraudtee seisukohast on tarvis rajada ühefaasiline alajaam ainult elektriraudtee tarbeks. Viimane lahendus on küll mõnevõrra odavam, kuid samas ei paku ühefaasiline lahendus täiendavat lisaväärtust piirkondlikule elektrivarustusele ning elanikkonnale. Lisaks eelnevale tuleb Rail Balticu trassilõikude elektrifitseerimise planeerimisel Eestis arvestada ka Lätis kasutusele võetavat lahendust ning uue liitumispunkti rajamisel tekib probleem ka sellele toite tagavate alajaamade valikul ja toiteliinide rajamisel. Parimaks lahenduseks antud tingimustel oleks lähtuda eelnevast trassisektsiooni toitevast alajaamast, ehitades sellest paralleelselt raudteega kulgev uus õhuliin. Antud lahenduse eeliseks on elektriraudteest tingitud probleemide koondumine ühte punkti ning seeläbi vähendades nende levimist teistesse elektrivõrguosadesse. Lisaks on kirjeldatud lahenduse korral välistatud nn koormuse hüppamise tekimine ning elektrivõrgu võimsusvoogude suuremad muutused, tulenevalt vedurite liikumisest ühest toitealajaama piirkonnast teiste. Teiseks alternatiivseks lahenduseks oleks elektritoite rajamiseks kasutada Sindi ja Kilingi-Nõmme alajaamu ühendavat õhuliini L106B. Kasutades maksimaalselt ära liini L106B on võimalik uus toiteliin välja ehitada minimaalse võimaliku pikkusega. Kirjeldatud lahendus on küll ökonoomsem kui rajada täispikkuses uus õhuliin, kuid elektrivõrgu seisukohast kaasnevad sellega märkimisväärsed probleemid. Liin L106B on üheaheelaline, kuid elektriraudtee vajab varustuskindluse seisukohast toidet vähemalt kahest allikas. Seega tuleb lisaks ehitada täiendav üheaheelaline õhuliin. Võttes arvesse liini L106B rekonstrueerimist, mille korral tuleb kasutada spetsiaalseid õhuliinimaste 110 ja 330 kV pingestme ühiseks paigaldamiseks, muutuks täiendava ahela lisamine antud õhuliinile keerukaks. Teisest küljest oleks võimalik teha katkestus õhuliinile L106B ning luua seeläbi elektriraudteele toide kahest toitepunktist, millest üks tekiks Sindi ning teine Kilingi-Nõmme alajaamast. Viimane lahendusvariant ei ole aga soovitatav, kuna seeläbi pikeneb toiteliin Sindi suunal ja halveneb Kilingi-Nõmme alajaama olukord. Antud lahendus avaldaks negatiivset mõju ka elektriraudteele, kus häiringu korral raudteele toite tagamisel Kilingi-Nõmme suunalt on tegemist äärmiselt pika toiteliiniga ülekandevõrgu peamisest sõlmalajaamast. Antud ühendus ei ole elektriliselt piisava tugevusega ja elektriraudteest tingitud probleemid võivad suureneda ning nende mõjud ulatuda kaugemale elektrivõrku. Võttes arvesse eelnevaid asjaolusid osutub parimaks lahenduseks 4A-1A raudteelõigu elektrifitseerimisel uute õhuliinide ehitamine. Eelneva analüüsi tulemuste põhjal valitud potentsiaalsed liitumiseks sobivad sõlmalajaamad ning nende parameetrid on toodud tabelis 7.1.

Tabelis 7.1 toodud alajaamade andmed kinnitavad väidet, et Tallinna ja selle lähiümbruse alajaamade puhul on tagatud piisav elektriline tugevus elektriraudtee liitumiseks. Tabeli andmetes kajastub ka Raplamaa lõigul paiknevate alajaamade elektriline nõrkus, millest kõige tugevaks osutub juba eelnevalt mainitud Rapla alajaam. Pärnu piirkonnas on elektriliselt tugevaim Sindi alajaam, millele jäävad alla Pärnu linnasisesed alajaamad. Eelnevalt analüüsitud probleemseima trassilõigu 4A-1A piirkonda jääva ainsa Kilingi-Nõmme alajaama elektrilist nõrkust kinnitavad ka tabeli 7.1 andmed. Kilingi-Nõmme alajaama elektriline tugevus osutub elektriraudtee liitumiseks ebapiisavaks toite korral nii Sindi kui ka Viljandi poolt, mil alajaama lattidel esineb minimaalne lühisvõimsus.

### 7.1.2 Teoreetiline pingesümmeetria analüüs

Esmane liitumispunktiks sobilike alajaamade valik põhines nende geograafilisel paiknemisel planeeritava raudteetrassi läheduses. Järgnevalt võrreldakse määratud alajaamu elektriraudtee koormuse iseloomust tuleneva pingesümmeetria järgi. Erinevalt peatükist 6, kus käsitletakse ülekandesüsteemi modelleerimisel 110 kV elektrivõrku, siis liitumispunktide hindamisel on kaasatud ka 330 kV sõlmalajaamad ning nende lühistugevus antud pingestmel, mis osutub oluliseks esmaste hinnangu andmisel. Alajaamade sobivuse hindamiseks kasutatakse teoreetilise pingesümmeetria analüüsi meetodit, mis põhineb ajalooliselt väljakujunenud empiirilisel avaldisel (7.1). Oma lihtsuse tõttu osutub avaldis otstarbekas esmase pingesümmeetria taseme määratlemisel.

$$k_a = \frac{S_r}{S_k} \cdot 100\% \quad (7.1)$$

kus  $k_a$  – pingesümmeetria tegur %;  
 $S_r$  – elektriraudtee koormus MVA;  
 $S_k$  – alajaama lühisvõimsus MVA.

Avaldisega (7.1) on võimalik määrata alajaamas, kuhu on ühendatud ühefaasiline elektriraudtee koormus  $S_r$ , tekkivat pingesümmeetriat. Antud meetodi peamiseks eeliseks on avaldise lineaarsus ning lihtsus, mis teeb selle praktilistes ülesannetes kergesti rakendatavaks. Lisaks sisaldab meetod lihtsasti määratavaid parameetreid. Pingesümmeetria tegur iseloomustab alajaama sobivust liitumispunktiks, kuna mida kõrgem on pingesümmeetria alajaamas seda suuremad on ka teised keerukamalt käsitletavad mõjud elektrisüsteemile. Antud meetod taandab kõik alajaamad ühtsele võrreldavale suurusele olenemata nende pingestmetest ja konfiguratsioonidest, mis lihtsustab alajaamade sobivuse ning võimalike probleemide tekkimise hindamist.

Meetodi peamiseks puuduseks osutub selle ebatäpsus, mis tuleneb empiirilisusest ning üldistuses. Meetodi teel saadud tulemused kehtivad ainult ühe staatilise stsenaariumi korral, mille alusel on arvatud alajaama lühisvõimsus. Samuti pole antud meetodi puhul võimalik hinnata pingesümmeetria levimist alajaama lattidelt kaugemale.

Käesoleva analüüsi teostamiseks on vaadeldavaks elektriraudtee koormusvahemikuks liitumispunktis valitud 5...50 MVA, mis vastab teoreetiliselt 1 kuni 10 keskmise veduri samaaegsele kasutamisele ühe toitalajaama piirkonnas. Seega on antud koormusvahemiku korral täidetud ka võimalikud ekstreemsemad esineda võivad olukorrad liitumispunktis. Joonis 7.3 kujutab avaldise (7.1) teoreetilist rakendust, kus vaadeldakse elektriraudtee koormusest tekkivat teoreetilist

pingeasümmeetriat. Graafiku koostamisel on lähtutud alajaama lühisvõimsustest vahemikus 0...10 000 MVA ning elektriraudtee koormusest vahemikus 5...50 MVA. Lühisvõimsuste vahemiku valik tugineb tabelis 7.1 esitatud lühivõimsuste andmetele. Joonisel 7.3 on kantud ka pingeasümmeetria piirid, kus 1% on lubatud ühele liituvale koormusele ning 2% on kogu alajaamale lubatud piirväärtus. Joonis 7.3 iseloomustab teoreetilist seost pingeasümmeetria, elektriraudtee koormuse ja toitealajaama lühisvõimsuse vahel kinnitades, et mida suurema lühisvõimsusega alajaama elektriraudtee ühendada, seda väiksemad on võimalikud tekkivad mõjud. Jooniselt 7.3 on näha, et lühisvõimsuse vahemikku 100...5500 MVA jäävate alajaamade korral ületatakse ühele tarbijale lubatavat pingeasümmeetria piirväärtust kõigi vaadeldavate koormuste juures. Vaadeldes tabelis 7.1 toodud andmeid on näha, et määratud alajaamade 110 kV lattidel tekkivad lühisvõimsuse väärtused jäävad antud vahemikku. Seega võib järeldada, et elektriraudteest tekkiv pingeasümmeetria võib kujuneda oluliseks elektrikvaliteedi probleemiks. Jooniselt 7.3 on näha, et eriti probleemseteks kujunevad antud koormusvahemiku korral alajaamad, mille lühisvõimsused jäävad vahemikku 100...3000 MVA. Arvestades antud asjaolu selgub, et käesoleva uurimustöö käigus valitud alajaamadest võivad probleemid tekkida kõigis Rapla- ja Pärnumaa trassivariantidele valitud liitumisalajaamades. Vaadeldes alajaamade minimaalseid lühisvõimsusi jäävad lubatava pingeasümmeetria piiridesse vaid Järve ja Kiisa alajaamad, kõigis ülejäänud alajaamades võib valitud tingimuste juures elektriraudteest avalduda olulised mõjud. Joonisest 7.3 on näha, et eriti järsult kasvab pingeasümmeetria alajaama väiksema kui 1000 MVA lühisvõimsuse juures. Sellest võib tabeli 7.1 andmete põhjal järeldada, et Raplamaa piirkonna alajaamad võivad osutada probleemseteks liitumispunktideks, kuna nende minimaalseid lühisvõimsused jäävad all 1000 MVA. Halvimaks osutub olukord Kehtna alajaamas, kus miinimum tingimustel on lühisvõimsuse väärtuseks vaid 283 MVA. Joonisel 7.3 toodud graafiku põhjal avalduvad Kehtna alajaamas elektriraudteest tulenevad arvestatavad mõjud. Joonisel 7.3 toodud graafikute ning tabeli 7.1 andmete analüüsi tulemused kinnistavad eelnevat koondplaanide põhjal kujunenud analüüsi tulemusi erinevate alajaamade elektrilise tugevuse ja nende sobivuse osas elektriraudtee liitumispunktideks.

Järgnevalt vaadeldakse lähemalt igas alajaamas tekkida võivat pingeasümmeetria väärtust. Tehava analüüsi tulemuste alusel on võimalik määrata iga alajaama jaoks maksimaalne lubatav elektriraudtee kontaktvõrgu koormus, võttes arvesse pingeasümmeetria seatud piirmäärasid.



*Joonis 7.3. Teoreetiline pingesümmeetria erinevate elektriraudtee koormuste ja alajaama lühisvõimuste korral*

Pingesümmeetria analüüsi tulemusi kajastavad joonistel 7.4 kuni 7.15 toodud graafikud. Graafikutel esitatud alajaamade pingesümmeetria tekkimisel on aluseks võetud, et analüüsitava alajaama lattidele liituv elektriraudtee kontaktvõrgu koormus muutub vahemikus 0...50 MVA. Pingesümmeetria kõverad on esitatud nii alajaama maksimaalse kui ka minimaalse lühisvõimsuse korral. Antud graafikud annavad ülevaate välja valitud liitumispunktide sobivusest elektriraudtee liitumispunktideks. Lisaks on toodud graafikutelt võimalik määrata maksimaalset elektriraudtee koormust, mis osutub arvestades pingesümmeetria piirmäärasid võimalikuks antud alajaama ühendada.

## **7.2 Elektriraudtee koormusest põhjustatud pingesümmeetria hinnang**

Käesolevas alapeatükis käsitletakse elektriraudtee talitlusest tingitud pingesümmeetriat liitumispunktis ning selle võimalikku levikut ülekandevõrgu teistesse sõlmalaamadest. Peatükis 7.1.2 analüüsi iseloomustab teoreetilise pingesümmeetria väärtusi ülekandevõrgus, kui konkreetse alajaama liidetakse elektriraudtee koormus. Tulenevalt analüüsi iseloomust ei osutunud võimalikus vaadelda pingesümmeetria hajumist ülekandevõrgus. Alljärgnevalt vaadeldakse pingesümmeetria jagunemist ülekandevõrgus erinevate kontaktvõrgu liitumistrafode korral ja analüüsitakse *PSCAD*is läbiviidud simulatsioonide tulemusi. Analüüsi teostamiseks on kasutatud peatükis 6 kirjeldatud *PSCAD* tarkvaras koostatud mudeleid. Simulatsioonide läbiviimiseks on valitud 2020. aastaks prognoositud maksimaalsete koormuste mudelid ning käesolevas aruandes esitatud tulemused vastavad vaid antud stsenaariumile. Elektriliinide ülekandevõimsuste analüüsi tulemused peatükis 7.1.3 näitasid, et täiendav elektriraudtee koormus ei avalda suurel määral mõju ülekandevõrgu liinide koormatusele ning kasutatud koormusmudelite tõttu on antud mudeli konfiguratsioonis prognoositavad tulemused sarnased. Antud simulatsioonide ja analüüside teostamisel ei pöörata tähelepanu jaotusvõrgu koormuste pingetundlikkusele ja sellest täiendavale pingesümmeetria tekkimisele. Uurimustöö järgnevas etapis osutub aga vajalikuks koormusmudelite ja nende pingetundlikkuse täpsustamine vastavalt tegelikkusele. Seejuures saab oluliseks linnasiseste kaabelvõrgu mahtuvuse arvesse võtmine, kuna käesolevate koormusmudelite koostamisel on aluseks võetud 110 kV jaotlate trafofiidrites mõõdetud koormused, milles ei avaldu tegelik jaotusvõrgu mahtuvus. Jaotusvõrgu tegelikust mahtuvusest genereeritud reaktiivvõimsus on äärmiselt tundlik pinge amplituudväärtuse muutustele ning pingesümmeetria korral põhjustab see koormuse muutumist asümmeetriliseks, vaadelduna 110 kV alajaama mõõtefiidritest.

Alljärgneva analüüsi läbiviimiseks on valitud kolm põhilist trafode tüüpi elektriraudtee liitumistrafodena, milleks on: jõutrafo ja kaks eritüübilist trafot – *Scott*- ja V-ühendusega trafo. Antud analüüsis ei käsitleta autotrafot, kuna tulenevalt selle ehitust ja ühendusest ülekandevõrguga on viimase käitumine samaväärne jõutrafoga. Antud trafotüüpide mudeleid ja nende koostamist kajastab täpsemalt peatükk 6.2. Pingesümmeetria analüüsimisel on lähtutud peatükis 7.1 kirjeldatud Rail Baltica trassidest ning valituks osutunud alajaamadest. Elektriraudtee koormuseks on kõigi liitumistrafode korral valitud 24 MVA (20 MW), mis vastab neljale peatükis 6.3 kirjeldatud veduri mudelile. Seejuures ei ole veduri mudelite puhul arvestatud muutuvat

koormuskarakteristikut ning koormus on modelleeritud konstantse takistusega püsikoormusena. Püsikoormusmudeli rakendamine võimaldab eritüüpsete trafode korral saadud tulemusi analüüsida võrdsetel tingimustel ning välistada koormuse muutusest ja trafode eriomadustest tingitud mõjusid. Koormuse määramisel on arvesse võetud, et maksimaalselt võiks ühe liitumispunkti toitepiirkonda ühendada, kas kaks kaubarongi või neli reisirongi, millede nimivõimsused on vastavalt 10 ja 5 MW.

Analüüsimisele tuleva *Scott*- ja V-ühendusega trafode puhul on vaadeldud täiendavat juhtumit, kus kontaktvõrgu päri- ja vastusuunad on koormatud ebasümmeetriliselt. Selleks, et pingesümmeetria tulemused oleksid võrreldaval tasemel on koormuse väärtuseks valitud koguvõimsus 24 MVA (20 MW), mis on ühendatud kontaktliinil ühte suunda ning paigutatud kontaktvõrgus võrdsetele kaugustele liitumispunktist. Antud täiendava olukorra vaatlemine osutub vajalikuks, kuna *Scott*- ja V-ühendusega trafode korral avaldab sekundaarahela faaside koormuse sümmeetria otseselt mõju ülekandevõrgus tekkivale pingesümmeetriale.

Peatükis 6.3 kirjeldatud elektriraudtee vedur on modelleeritud aktiiv- ja induktiivtakistusena, mille parameetrid on arvatud konkreetsele kontaktvõrgu püsitalitluspingele. Sellest tulenevalt osutub vajalikuks tagada kontaktvõrgus muutumatule nimipingele vastav toitepinge, et saavutada konstantne koormus. Mudelite seadistamise lihtsustamiseks ning pingesümmeetria simulatsioonideks vajamineva koormuse konstantsuse tagamiseks, osutub vajalikuks toitetrafo ülekandesuhte vastav muutmine. Trafo ülekandesuhte muutmise üheks võimalikus lahenduseks on kasutada peatükis 6.1.1 kirjeldatud „*slider-control*“ juhtimisblokke. Paraku on nende seadistamine aeganõudev ja otstarbekamaks osutub automaatse juhtimissüsteemi välja töötamine, mis ühtlasi välistaks mudeli seadistamist katse-eksituse meetodiga. Kontaktvõrgu pinge reguleerimiseks on koostatud täiendav juhtimissüsteem, mis reguleerib automaatselt kontaktvõrgu toitetrafo ülekandesuhet astmelüliti seisundi muutmisega trafo mudelis. Kirjeldatud juhtimissüsteemi skeem on toodud joonisel 7.24.

Astmelüliti juhtimissüsteemi koostamiseks on kasutatud *PSCAD* tarkvara standardset PI kontrollerit. Juhtimissüsteemi esimeses moodulis arvutatakse kontaktvõrgus mõõdetavat pingesignaali ning soovitava kontaktvõrgu pinge võrdlussignaali põhjal selle mõõteviga, mille tulemusena arvutab PI kontroller mõõtevea kõrvaldava väljundsignaali. Juhtimissüsteemi viimaseks mooduliks on piiraja, mille ülesanne on piirata väljundsignaali väärtust sobivasse vahemikku ning vältida juhtimissüsteemi üle reageerimist. Antud juhtimissüsteem on esitatud kõige lihtsamal kujul, milles pole arvesse võetud astmelüliti väljundi astmelist muutmist, seda seetõttu, et antud koormuste väärtustest tingitud pingemuutus ei põhjusta suuremat juhtimissüsteemi väljundi muutust kui  $\pm 1$  aste. Sellest tulenevalt puudub vajadus keerukama juhtimissüsteemi järele ning PI kontrolleri korrektse seadistamisega on võimalik saavutada rahuldavaid tulemusi. Valides PI kontrolleri proportsionaalse võimendusahela võimendusteguri väärtuse väiksemaks kui üks ning suure integraatori ahela ajakonstandi, on võimalik saavutada astmelüliti tegelikule käitumisele ligilähedaselt sarnane tulemus. Käesolevas uurimustöös kasutatud PI kontrolleri seadistuseks valitud parameetrid on näha joonisel 7.25. PI kontrolleri seadistus näitab, et proportsionaalne võimendustegur on valitud 0,1 ning ajakonstant 0,1 s, mis tagab juhtimissüsteemi aeglase reaktsiooni sisendi suurele muutusele ning integraatori 0,1 s ajakonstandi väärtuse tõttu vähendab kontroller tekkinud viga aeglaselt. Selline koosmõju võimaldab saavutada soovitud tulemus ilma, et peaks täiendavalt modelleerima astmelist käitumist imiteerivat osa. Iga jõutrafo korral koostatud kontaktvõrgu mudelis on kasutatud ühte eraldiseisvat astmelüliti kontrollerit, mis tagab kontaktvõrgu koormuse konstantsuse sõltumata 110 kV ülekandevõrgu tegelikust pingest.

Kuna eritüübilised *Scott*- ja V-ühendusega trafod on koostatud kahe eraldiseisva trafo kombinatsioonist, siis on nende astmelülite juhtimiseks rakendatud kahte eraldiseisvat astmelüliti kontrolleri. Antud lahendus võimaldab mõlema sekundaarahela pinget individuaalset seadistamist ning tagab mõlemas ahelas konstantse koormuse. Lisaks trafo astmelülitele on analüüsi läbiviimise lihtsustamiseks koostatud *PSCAD* tarkvara standardsetest komponentidest koosnev täiendav pingesümmeetria mõõtev moodul, mille graafiline esitus on kujutatud joonisel 7.26.

*Joonis 7.26. Koostatud pingesümmeetria mõõteblokk PSCAD-is*

Koostatud moodul põhineb „*On-Line Frequency Scanner (FFT)*“ komponendil, mis on seadistatud mõõtma pinget päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponendi amplituudväärtusi ning nende faasinihkenurkasid nimisagedusel. Järgnev osa moodulist arvutab mõõtetulemuste põhjal avaldise (7.2) abil pingesümmeetria teguri kogu simulatsiooni vältel. Avaldis on oma olemuselt lihtne, kuid pinget täpse päri- ja vastujärgnevuskomponentide määramine teeb selle praktilise rakendamise keerukaks. Kasutades *PSCAD* tarkvara võimalusi *FFT* komponendi näol, on võimalik määrata täpsed amplituudväärtused päri- ja vastujärgnevuskomponentidele, tagades selle läbi avaldise otstarbekuse simulatsioonide läbiviimisel.

$$k_a = \frac{v^-}{v^+} \cdot 100\% \quad (7.2)$$

kus  $k_a$  – pingesümmeetria tegur %;

$v^-$  – alajaamas mõõdetud pinget vastujärgnevuskomponent kV;

$v^+$  – alajaamas mõõdetud pinget pärijärgnevuskomponent kV.

Avaldise (7.2) põhjal loodud moodul lihtsustab oluliselt pingesümmeetria analüüsimist, kuna puudub vajadus silmulatsioonide järgselt mõõtetulemuste töötlemiseks läbi täiendava matemaatilise analüüsi. Mooduli väljundi graafiliselt esitatud tulemused on sobival kujul pingesümmeetria analüüsi läbiviimiseks.

Järgnevalt tulevad vaatluse alla peatüki 7.1 analüüsi tulemustel valitud elektriraudtee liitumispunktiks sobivate alajaamade eraldiseisvad simulatsioonid ja nende tulemuste analüüs. Simulatsioonide läbiviimisel on arvestatud, et koormus paikneb korraga vaid ühes alajaamas ning ülejäänud liitumispunktides talitleb kontaktvõrk tühijooksu režiimis. Koormuste paiknemistel on arvestatud peatükis 7.1.1 kirjeldatud sinise ning musta ringjoonega tähistatud võimalikke trassivariante. Pingesümmeetriat ning selle jaotumist vaadeldakse eraldiseisvalt kolmes tsoonis: Harju-, Rapla- ja Pärnumaal. Esimesena teostatakse simulatsioonid Harjumaa tsoonis, vastavalt sinise ja musta ringjoonega tähistatud trassile. Esmalt on koormus modelleeritud Iru alajaama ning ülejäänud vaadeldavad liitumispunktid Järve, Rapla, Sindi, Kilingi-Nõmme talitlevad tühijooksu režiimis. Järgmiseks modelleeritakse koormus Järve alajaamas ning Iru ja ülejäänud liitumispunktid on tühijooksu režiimil. Analoogselt viiakse simulatsioonid läbi kõikide alajaamadega, kusjuures Iru alajaam on võetud baaspunktiks talitledes tühijooksu režiimis. Teisena teostatakse simulatsioonid koormuse paiknemisel Raplamaa tsooni potentsiaalsete liitumispunktide Rapla, Kehtna ja Järvakandi alajaamas, Harju- ja Pärnumaa liitumispunktid on sel hetkel tühijooksu režiimis. Analoogselt teostatakse simulatsioonid ka Raplamaa tsooni Sindi, Metsakombinaadi, Papiniidu ja Kilingi-Nõmme alajaamades. Elektriraudtee koormuse paigutamise erinevate liitumispunktide vahel ja nende simulatsioonide tulemuste põhjal osutub võimalikuks analüüsida pingesümmeetria hajumist ülekandevõrgus.

### **7.2.1 Simulatsioonide tulemused Harjumaa sõlmajaamades**

Joonised 7.27 kuni 7.29 kajastavad simulatsioonide tulemusi ja pingesümmeetria tekkist elektriraudtee sümmeetrilise koormuse ühendamisel Harjumaal paiknevas Iru alajaamas. Pingesümmeetria hajumise määramiseks kajastuvad joonisel 7.27 ka Iru alajaamaga otseselt ühenduses olevate Kallavere, Ida ja Järve alajaamade pingesümmeetria tegurid. Joonisel 7.28 on toodud Iru alajaamale elektriliselt lähedal olevate Lasnamäe ja Jüri ning kogu piirkonda toitvate Kiisa ja Aruküla alajaamade tulemused. Võrdlemaks trafode omadustest tingitud erinevusi on tulemused igas alajaamas esitatud vastavalt jõu-, *Scott*- ja V-ühendusega trafo rakendamisel. Mudelite seadistusest tulenevalt, ei oma käesolevas analüüsis graafikute ajatelg olulist tähtsust, kuna vaadeldav koormus on konstantne ning seega on ka pingesümmeetria graafikutel ajas konstante. Joonise 7.27 tulemustest on näha, et nii Iru kui ka sellega ühendatud alajaamades, ei

alajaamade paremaid tulemusi ning suuremat valikuvõimalus antud piirkonnas võiks elektriraudtee liitumispunktina eelistada Jüri alajaama asemel Aruküla alajaama. Lisaks võiks elektriraudtee liitumist vältida ka Kiisa alajaama. Kuigi viimane on elektriliste näitajate ja asukoha poolest igati sobiv, siis võib elektriraudtee koormus mõjutada Kiisa alajaamas paiknevat avariireservelektrijaama tööd ning välistatud pole ka kaudsete mõjude kandumine Estlink-1 talitlemisse, seda juhul kui Harku alajaamas paiknev konverterjaam töötab alaldi režiimis. Kiisa alajaama elektriraudtee koormuse liitumisel on tarvis täiendavalt uurida Estlink-1 ja elektriraudtee koosmõjusid, kuna praegusel hetkel puudub kirjanduses piisavalt veenvaid tulemusi hindamaks elektriraudtee koormuse mõju alalisvooluühendusele. Simulatsiooni tulemustest avaldus Kiisa alajaamas madal pingesümmeetria tegur, seega ei tekiks võimalikud probleemid mitte elektriraudtee püsitalitlusel vaid kiireloomuliste dünaamiliste protsesside ja lühiste puhul. Antud ebamäärasusest tulenevalt ei ole võimalik lugeda Kiisa alajaama täielikult sobivaks elektriraudtee liitumispunktiks. Seega osutuva Harjumaal sobivateks elektriraudtee liitumispunktideks Iru, Järve ja Aruküla alajaamad.

### **7.3 Kokkuvõte**

Antud peatükk koondab enda alla uurimustöö käigus koostatud materjalide ja mudelite põhjal teostatud elektriraudteest tingitud mõjude hinnangut 110 kV ülekandevõrgule. Peatüki esimeses osas määrati Rail Balticu võimalikest avaldatud trassivariantidest lähtudes selle liitumispunktideks sobivad alajaamad. Valiku tegemisel võeti arvesse trassi vahetus läheduses asuvat elektrivõrku ning esimene valik tehti alajaamade geograafilise paiknemise põhjal. Alapeatüki 7.1.1 geograafiline analüüs näitas, et Harjumaal ja Tallinnas kujuneb välja kaks peamist trassisuunda, mille mõlema puhul on sobilike liitumispunktide valimisel määrav roll kogu elektriraudtee süsteemile. Mõlema väljapakutud lahenduse alajaamade valiku illustreerimiseks tähistati koostatud koondkaartidel (Joonis 7.1 ja Joonis 7.2) erinevate värvidega (sinine ja must) 25 km raadiused ringjooned, kus liitumispunktide sobivaimad asukohad jäävad ringjoonte keskpunktide vahetusse läheduses ja seega kaetakse liitumispunktide valikul enim võimalikke trassivariante. Vastavalt trassivariantidele osutusid geograafilise analüüsi tulemusel Harjumaa piirkonnas valituteks Iru, Järve, Kiisa, Aruküla ja Jüri alajaamad. Analoogselt määrati Raplamaa piirkonnas edasiseks analüüsiks Rapla, Kehtna ja Järvakandi alajaamad ning Pärnumaal Sindi, Metsakombinaadi, Papiniidu ja Kilingi-Nõmme alajaamad. Geograafiline analüüs näitas, et Pärnust lõunapoolsete liinilõikude elektritoite tagamiseks puuduvad ülekandevõrgus vastavad võimalused, kuna puuduvad sõlmajaamad ja ülekandevõrk. Antud trassilõik osutub kogu Rail Balticu trassist kõige suuremaks väljakutseks, kuhu on elektrivarustuse tagamiseks paratamatult tarvis luua

uus liitumisalajaam. Geograafilise analüüsi põhjal pakuti välja kaks võimalikku lahendust, millest esimese korral lahendatakse probleem ühe osana regionaalsest elektrivarustusest luues uus piirkonda toitev kolmefaasiline sõlmajaam, kuhu on võimalik liita ka elektriraudtee koormus. Teise lahendusena pakuti välja ühefaasiline alajaam rajamist ainult elektriraudtee tarbeks. Geograafilise analüüsi tulemusele tuginedes teostatis alapeatükis 7.1.2 kirjeldatud esmase pingesümmeetria analüüs valitud alajaamadele, mis võimaldamaks hinnata nende sobivust elektriraudtee liitumispunktideks lähtuvalt alajaamade elektrilisest tugevusest. Analüüsi tulemuste põhjal jagunevad alajaamad kolme gruppi. Need, mille puhul probleeme ei tekkinud ja mis osutuvad liitumispunktideks sobivateks (Iru, Järve, Kiisa, Aruküla ja Sindi alajaam). Need, mille korral tekkisid teatud koormustingimuste juures teatavad piirangud ja nende paremaks sobivuseks on vaja rakendada täiendavaid meetmeid (Jüri, Rapla, Metsakombinaadi ja Papi-niidu alajaam). Viimase grupi moodustavad alajaamad, mis osutusid ebasobivateks ning vajavad elektriraudtee koormuse liitumisel suuremahuliste täiendavate meetmete rakendamist (Kehtna, Järvakandi ja Kilingi-Nõmme alajaam).

Ainult alajaamade pingesümmeetria seisukohalt analüüsimisest jääb väheks ja seega annab peatükk 7.1.3 põhjaliku ülevaate valitud alajaamade ülekandeliinide koormatusest, hindamaks ülekandevõrgu võimekust elektritoide tagamisel elektriraudtee kontaktvõrgu süsteemile. Tulemused näitavad, et kõik vaadeldavad liinid on alakoormatud ja elektriraudtee koormuse lisandumine nende koormatust olulisel määral ei mõjuta.

Peatükis 7.1 tehtud analüüside tulemustest järeldub, et elektriraudtee liitumisel saab peamiseks probleemiks alajaamade elektriline tugevus. Elektrilise tugevuse tõstmine ehk ekvivalentse takistuse vähendamine osutub aga alakoormatud ülekandeliinide tingimustes keeruline ülesandeks, kuna puudub otsene majanduslik põhjendus kogu elektrivõrgu konfiguratsiooni muutmiseks.

Antud uurimustöös vaadeldud elektrivõrgus kujuneb välja neli peamist erinevate võimalustega piirkonda, millest esimeseks on Harjumaa, kus elektriraudtee liitumisel probleeme ei teki. Teiseks piirkonnaks on Raplamaa, kus tänase seisuga praktiliselt puuduvad elektriraudtee liitumiseks sobivad alajaamad. Kolmandasse piirkonna moodustab Pärnumaa põhjaosa ning Pärnu linna lähiümbrus, kus elektriraudtee liitumiseks on kõik tingimused tagatud. Neljandaks ja kõige probleemsemaks piirkonnaks on Pärnumaa lõunaosa, kus puudub liitumiseks sobiv ülekandevõrk. Viimase puhul tuleb elektritoide tagamiseks paratamatult ehitada täiendavad ülekandeliinid ning liitumiseks sobiv alajaam. Raplamaal esinevate probleemide lahendamiseks



on välja pakutud kaks võimalikku lahendust, millest esimesel juhul tugevdatakse lõplikult valitaks osutuvate alajaamade elektrilisi ühendusi, vähendades seeläbi alajaamade ekvivalentseid takistusi. Tulenevalt aga ülekandeliinide vähesest koormatusest on antud lahendus majanduslikult raskesti põhjendatav. Alternatiiviks on rajada koos Rail Balticu trassiga paralleelselt täiendav ülekandeliin, seda siis kas Aruküla või Sindi alajaamast ja ehitada sobivasse kohta uus liitumisalajaam. Viimase lahenduse peamiseks eeliseks on elektriraudteest tingitud mõjude koondamine ühte piirkonda, kus nende minimeerimine on oluliselt efektiivsem. Lisaks välditakse seeläbi koormusvoogude suuremaid ümberjagunemisi kogu ülekandevõrgus veduri liikumisel ühest liitumispunkti tsoonist teise. Antud suurte võimsusvoogude pidev muutumine võib elektrivõrgule osutada täiendavaks stabiilsusriskiks.

Elektriraudtee koormuse poolt põhjustatud tegelikku pingesümmeetriat analüüsitakse peatükis 7.2 koostatud mudelite simulatsioonide tulemuste põhjal. Vaadeldakse ülekandevõrgu maksimaalset tekkivat pingesümmeetriat erinevate liitumispunktide korral ja selle levimist teistesse sõlmalajaamadesse. Analüüside tegemiseks kasutati käesolevaks uurimustööks koostatud mudelid *PSCAD* tarkvaras. Analüüsimisel ei võetud arvesse jaotusvõrgu koormuste pingetundlikust ning sellest täiendava pingesümmeetria tekkimist. Elektriraudtee liitumistrafodeks valiti jõutrafo ning kaks eritüübilist trafot – *Scott*- ja *V*-ühendusega trafo. Liitumistrafode korral kasutati elektriraudtee koormust 24 MVA (20 MW), mida modelleeriti konstantse takistusega püsi koormusena. Selline koormus võimaldab eritüübiliste trafode tulemusi võrrelda võrdsetel tingimustel. *Scott*- ja *V*-ühendusega trafode puhul käsitleti täiendavat juhtumit, kus trafode sekundaarahelad olid ebasümmeetriliselt koormatud. Tulemuste võrdluspunkti olemasoluks kasutati sümmeetrilise koormusega sama väärtust. Koormuse konstantsuse saavutamiseks kasutati trafo astmelüliti reguleerimiseks lihtsustatud juhtimissüsteem, läbi mille saavutati sekundaarahela pingekonstantsus. Lisaks trafo astmelülite juhtimissüsteemile koostati analüüside lihtsustamiseks *PSCAD* tarkvaras ka täiendav moodul pingesümmeetria mõõtmiseks. Antud moodul võimaldab silmulatsiooni tulemuste töötlemist juba toimuva simulatsiooni käigus, seega puudub vajadus nende hilisemaks töötlemiseks. Mooduli graafilise väljund tulemused on esitatud pingesümmeetria analüüsi läbiviimiseks juba sobival kujul.

Elektriraudtee koormuse liitumisel tekkiva pingesümmeetria teguri väärtusi ja selle hajumist analüüsiti piirkondade ning nendes paiknevate alajaamade kaupa. Harjumaa alajaamade tulemustest selgus, et jõutrafode rakendamisel tekkiv pingesümmeetria vastab kõigis alajaamades teoreetilisele ootusele. Eritüübiliste trafode rakendamisel sümmeetrilise koormuse korral osutub tekkiv pingesümmeetria väiksemaks. Asümmeetrilises olukorras toob eritüübiliste trafode

rakendamine kaasa aga jõutrafoost suurema pingesümmeetria. Tulemused näitasid, et asümmeetrilisest sekundaarahela koormusest on enam mõjutatud *Scott*-trafo. Harjumaal väljavalitud alajaamadest osutusid pingesümmeetria seisukohast sobivaks kõik vaadeldud alajaamad, kuna jõutrafo rakendamisel ei ületatud määratud koormuse juures lubatavat alajaamas tekkivat pingesümmeetria 1% piirmäära. Kõige enam oli elektriraudtee koormusest mõjutatud Jüri alajaam, kus asümmeetrilise koormuse korral ületas pingesümmeetria lubatavat piirmäära, külla aga osutub Jüri alajaam sobivaks jõu- ja V-ühendusega trafo rakendamisel. Siiski võiks elektriraudtee liitumisel eelistada antud juhul Aruküla alajaama, kus saadud tulemused osutusid paremateks. Kiisa alajaamas on elektriraudteest tingitud koormuse mõju madal, kuid et antud alajaam on seotud elektrivõrgule strateegiliselt tähtsade objektidega, võiks elektriraudtee liitumise seal välistada. Seega osutuvad Harjumaal täielikult liitumispunktideks sobivateks Iru, Järve ja Aruküla alajaamad.

Arvutused Raplamaa alajaamades näitasid, et pingesümmeetria tekitas olulisi probleeme kõigis valitud alajaamades. Mõju avaldas ka kogu elektriraudtee trassi teiste liitumispunktide tühihooksu talitlusest tekkiv pingesümmeetria, mistõttu on tekkiv pingesümmeetria üle lubatava piirmäära. Vaadeldavatest alajaamadest osutus liitumispunktiks sobivaks vaid Rapla alajaam ning seda ka ainult V-ühendusega trafode rakendamisel. Kehtna ja Järvakandi alajaamades tekkiv pingesümmeetria ületab lubatavaid piirmäärasid nii liitumispunktis kui ka elektriliselt kauges alajaamades, mistõttu pole antud alajaamadesse elektriraudtee liitumist võimalik planeerida.

Simulatsioonid Pärnumaal paiknevates alajaamades näitasid, et sarnaselt Raplamaa alajaamadega tekkisid olulised probleemid pingesümmeetrias. Pärnumaa alajaamadest sobib pingesümmeetria seisukohalt liitumispunktiks Sindi alajaam ning seda tingimusel, et rakendatakse täiendavaid lahendusi ülekandevõrgus. Lisaks selgus, et Kilingi-Nõmme alajaamast või seda toitevast õhuliinist uue liitumispunkti tarbeks elektritoite tagamine ei osutu otstarbekas ning mõistlikum oleks ehitada Sindi alajaamast uus kaheahelaline õhuliin paralleelselt elektriraudteega. Tehtud simulatsioonide tulemused toetavad juba varasemalt käsitletud lahendust, mille kohaselt osutub otstarbekas elektriraudteest tekkivate probleemide koondamine Sindi alajaama, kus siis rakendades täiendavaid meetodeid vähendada tekkivat pingesümmeetriat. Täiendavate meetmetena on välja pakutud *FACTS* seadmete kasutamist paralleelselt elektriraudtee koormusega ning *Scott*-trafo ja ühefaasilisest alalisvoolulingist kombineeritud hübriidsüsteemi. Kõikide teostatud simulatsioonide tulemused kinnitasid teoreetilise pingesümmeetria analüüsil eeldatud tulemusi ning nende põhjal kirjeldatud seoseid ja tehtud järeldusi.

## Kokkuvõte

Elektertranspordi teema on kogu üha kasvavat populaarsust. Otsing märksõnale „Rail Baltic“ annab portaali Postimees.ee kodulehelt viimase aasta jooksul 2370 tulemust ja märksõna „elektriauto“ 33 tulemust. Samad märksõnad teises populaarses portaalil Delfi.ee annavad vastavalt 285 ja 338 vastet. Ilmselgelt on elektriraudtee, ennekõike Rail Baltic poliitiline projekt, mida käesolev aruanne kuidagi kajastada ei soovi. Käesoleva elektritranspordi projekti ja aruande eesmärk on näidata nii elektriautode kui ka Rail Balticu mõju olemasolevale elektrivõrgule ja anda soovitusi võrguettevõtjale, et elektriautode ja Rail Balticu võrku ühendamine osutuks edukas.

Analüüsid esmalt elektriautosid, siis projekti teise etapi tulemustest selgub, et vähemalt esialgu ei põhjusta autode võrku ühendamine muutusi ülekandevõrgus ning autode massiline lisandumine annab esmalt tunda madalpingevõrgus, kus võib puudu jääda trafode võimsusest. Sellisele tulemusele jõuti aruande esimeses peatükis, kus modelleeriti elektriautode ühendamist kahte erinevasse võrku, millest üks on TTÜ linnak ja teine õhuliinidelt toidetav võrk. Mõlemal juhul arvutati välja palju peaks elektriautosid lisama, et see avaldaks mõju elektrisüsteemile. Järeldus on, et kõik sõltub madalpinge trafo võimsusest.

Elektriautodest on juttu ka aruande teises peatükis, kus uuriti elektriautode käitumist juhul kui ülekandevõrgus leiavad aset alla sekundi kestvad toitekatkestused või lühised. Selleks otstarbeks konstrueeriti katseseadeldis, mis imiteerib toitekatkestust ja võimaldab mõõta sinna külge ühendatud seadmete käitumist. Katseid tehes selgus, et lühis kestvusega 0,4 sekundit põhjustab laadimises 10 sekundilise katkestuse, mille mõju elektrienergia tarbimisele ei ole märkimisväärne. Arvestades, et Eestis on maanteeameti statistika kohaselt 755 elektriautot ja ühe auto laadimisvõimsus on umbes 2 kW, siis võib üks toitekatkestus kümneks sekundiks vähendada tarbitavat võimsust 1,5 MW võrra. See on võrreldav ühe võrgust eraldunud Eesti keskmise tuulikuga. Aastas lisandub meie teedele umbes 20 000 uut sõiduautot. Kui meil oleks samas mahus elektriautosid, siis räägiks me üksiku tuuliku eraldumise asemel juba 40 MW eraldumisest.

Käesoleva aruande teine vaadeldav temaatika käsitleb elektriraudteed ja selle mõju ülekandevõrgule. Kokkuvõtvalt saab teostatud analüüsi põhjal öelda, et elektriraudtee mõjud Tallinnas ja Tallinna ümbruses on oluliselt väiksemad kui Lääne- ja Lõuna-Eestis. See tuleneb otseselt elektrivõrgu tugevusest ehk võrgu lühisvõimsuse tasemest. Elektriraudtee liitumiseks tuleb ette näha 5...10 lahtri ehitamine Eleringi alajaamades. Siinkohal on arvestatud ka reservühenduste

vajalikkusega. Täpne ehitatavate lahtrite arv ja asukoht sõltuvad elektriraudtee lõplikust trassi-valikust ning täpsustatud tehnilistest arvutustest.

Elektriraudtee temaatika on käesolevas aruandes jaotatud viieks peatükiks (peatükid 3-7). Kolmandas peatükis tutvustatakse kontaktvõrkude süsteeme ning analüüsitakse erinevate riikide näidetel nende tehnilist teostust. Tehnoloogiate analüüs annab olulise ülevaate kontaktvõrkudes kasutatavatest eritüübilistest jõutrafodest ning kontaktvõrkude tehnoloogiast.

Käesoleva aruande neljandas peatükis käsitletakse elektriraudtee poolt põhjustatud häiringuid ning nende olulisi mõjusid elektrisüsteemile. Analüüsitakse erinevates riikides läbiviidud uuringuid ning vaadeldakse pingeasümmeeria mõjusid ülekandevõrgus. Lisaks pingeasümmeeriale vaadeldakse elektriraudtee vedurite ajamite poolt elektrivõrku tekitatud harmoonikute ulatust ja mõju. Neljanda peatüki viimases osas on analüüsitud vähem olulisemate häiringutüüpide olemust ja mõju.

Viiendas peatükis antakse ülevaade elektriraudteel kasutatavatest veduritest, nende ajamitest ning vaadeldakse vedurite arengu olulisemaid ajaloolisi sündmusi, mis on elektriraudtee arengule olulist mõju avaldanud. Peatüki analüütilises osas kirjeldatakse vedurite kiirendus- ning pidurduskarakteristikuid ning vaadeldakse vedurite modelleerimise teoreetilisi aluseid.

Aruande kuues peatükk käsitleb elektriraudtee modelleerimist ning sellega seotud temaatikat. Kirjeldatakse Eesti 110 kV ülekandevõrgu mudeli koostamist, selgitatakse olulisemate elementide modelleerimist ning mudeli koostamisel tehtud lihtsustusi. Antakse ülevaade kontaktvõrgu eritüübiliste trafode modelleerimisest *PSCAD* tarkvaras ning käsitletakse põhjalikult Carsoni meetodikat, mille rakendamine võimaldab arvutada kontaktvõrgu üksikelementide elektrilised parameetrid ja nende põhjal koostada kontaktvõrgu mudel. Peatüki teises osas kirjeldatakse projekti käigus koostatud teoreetilist elektriraudtee mudelit, mille tulemused on piisavalt täpsed hindamiseks elektriraudtee mõjusid Eesti elektrisüsteemile. Peatüki viimases osas kirjeldatakse elektriraudtee veduri lihtsustatud mudeli koostamist vastavalt olemasolevatele veduri karakteristikutele. Kirjeldatud meetod on oma olemuselt universaalne ning seda rakendades on võimalik modelleerida sisuliselt mistahes veduritüüpi.

Aruande seitsmes peatükk keskendub elektriraudteest tulenevaid võimalikke negatiivseid mõjusid elektrivõrgule. Tulemustest selgub, et valdavale enamusele vaadeldud alajaamadest on elektriraudtee poolt avaldatavad mõjud märkimisväärsed ning seda tuleks arvesse võtta elektrivõrgu plaanimise faasis. Elektriraudtee pidev ja järsk koormuse muutus võib mõju avaldada ka teistele võrguga liitujatele, mistõttu on antud temaatika sügavam tundmine olulise tähtsusega.

## Täiendavad tööd kolmandal aastal

Käesoleva projekti etapis on läbi töötatud ja analüüsitud suurtes koguses elektriraudtee süsteeme käsitlevaid artikleid, välja antud raamatuid ja saada olevaid andmeid. Nende põhjal on koostatud põhjalikud arvutusmodelid ülekandevõrgu, kontaktvõrgu ning elektriraudtee vedurite kohta. Tehtud tööst maksimaalse väärtuse saamiseks tuleks seda jätkata ning seniselt koostatud mudeleid täiendada. Senise analüüsi osas oli mudelite koostamisel ja seadistamisel nende talitlusest näha, et koormuse muutuseid käsitlevate protsesside analüüsimiseks osutub vajalikuks täiendavalt modelleerida elektrisüsteemis paiknevaid generaatoreid. Alljärgnevalt on toodud võimalikud ülekandevõrgu mudelite täiendused, mida on järgnevas etapis vajalik teha:

- Koostatud ülekandevõrgu jaotamine väiksemateks osadeks võimaldamaks simulatsioonide puhul rakendada väiksemat arvutussammu.
- Uute ülekandevõrguosadele *Thevenin* ekvivalentide arvutamine ning mudelite seadistamine vastavaks tegelikule ülekandevõrgu olukorrale.
- Väo KTEJ, Iru EJ ja prügipõletus, Pärnu KTEJ ning Kiisa avariijaama generaatorite mudelite koostamine ja integreerimine ülekandevõrgu mudelisse.
- Valitud elektriraudtee liitumispunktile ülekandevõrgu seisukohast välja töötada kriitilised avarii- ja hooldeskeemid.
- Ülekandevõrgu mudelite seadistamine vastavalt avarii- ja hooldeskeemidele.
- Jaotusvõrgu koormuste täpsustatud mudelite koostamine, milles arvestatakse jaotusvõrgu tegeliku mahtuvust.

Koostatud mudeli täienduste põhjal on plaanis kolmandal aastal teostada järgnevad analüüsid:

- Elektriraudtee vedurite regeneratiivsest pidurdamisest tingitud mõjude analüüsimine normaalskeemile vastava dünaamilise ülekandevõrgu mudeliga.
- Normaal- ja hoolduskeemi puhul kontaktvõrgu pikendatud lühistalitluse mõjude analüüs ülekandevõrgus.
- Pingeasümmeetria mõju modelleeritud generaatorite talitlusele.
- Pantograafi ja ülekandeliini omavahelisest ebapiisavast kontaktist tingitud siirdeprotsessidest tekkiva pingeväreluse mõju hindamine.
- Elektriraudtee koormuse siirdumine ühe liitumispunkti piirkonnast teise ning selle mõjud modelleeritud generaatoritele.

Lisaks modelleerimisalasele uuringule tuleks jätkata ja edasi minna ka majandusliku mõju uuringuga. Seda ennekõike elektrisüsteemi ja ülekandevõrgu investeeringute seisukohast, aga ka elektrienergia üldise tarbimise muutuse seisukohast. Järgnevalt on loetletud punkte, mis vajaksid samuti edasist uurimist:

- Hinnata elektritranspordi mõju Eesti energiamajandusele (fossiilkütustelt üleminek elektrile ja seeläbi transpordi mõju CO<sub>2</sub> heitmetele).
- Elektritarbimise muutused tulenevalt elektrirongide lisandumisest.
- Mõjud energiapoliitika ja kliimaeesmärkide täitmisele.
- Hinnata võimalikke investeeringute mahtusid, mis võivad kaasneda elektritranspordi suuremahulisel kasutusele võtmisel – alajaamade laiendamise vajadus, vajadus (kaabel)liinide ja liinikoridoride rajamiseks, turvalisus ja töökindlus ning info edastus jms.

Täpsemad tegevused tuleks läbi rääkida pärast lõpparuande esitamist ja tellija poolsete kommentaaride saamist ning pärast avaliku arutelu aruannet tutvustaval seminaril. Sõltuvalt täpsematest teemadest, tuleb mõnevõrra korrigeerida projekti täitjate nimekirja, kaasates projekterijaid, majandustaustaga analüütikuid ja informaatikuid.