

Eleringi toimetised
nr 2/2015 (10)

elering
ÜHENDAME ENERGIAD

 TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOOL

ELEKTRIRAUDTEE JA SELLE MÕJUD ELEKTRISÜSTEEMI TALITLUSELE

Jako Kilter, Triin Kangro, Tanel Sarnet, Ivo Palu

Tallinn 2015



SISUKORD

Eessõna	6
Sissejuhatus	7
1 Elektriraudtee areng	8
1.1. Elektrirongide areng Eestis ja uued FLIRT-tüüpi elektrirongid	10
1.2. Euroopa arengusuunad	10
1.3. Investeeringud Läänemere piirkonna transpordisektorisse	11
1.4. Projekt Rail Baltic	13
2 Elektriraudtee kontaktvõrgusüsteem	16
2.1. Eesti 3 kV DC kontaktvõrk	17
2.2. Kontaktvõrkude toitesüsteemid	17
2.2.1. 1x25 kV toitesüsteem	17
2.2.2. 2x25 kV toitesüsteem	18
2.2.3. 3/2x25 kV toitesüsteem	18
2.2.4. 1x25 kV ja 2x25 kV toitesüsteemi võrdlus	19
2.2.5. Kontaktliinide auto- ja lisapingetrafod	20
3 Elektriraudtee vedurid	22
3.1. Takistitel põhinev ajam	23
3.2. Dioodalaldil põhinev ajam	23
3.3. Türistoridel põhinev inverterajam	23
3.4. Transistoridel põhinev inverterajam	23
4 Elektriraudtee mõju elektrisüsteemi talitlusele ja elektri kvaliteedile	24
4.1. Püsitalitusprobleemid	25
4.2. Pingesümmeetria	25
4.3. Toitepinge harmoonikud	28
4.4. Regeneratiivne pidurdamine	30
4.5. Elektromagnetiline ühilduvus	31
4.6. Ebahütlane kontakt pantograafi ja kontaktliini vahel	31
4.7. Toitepiirkondadeülene liikumine	33
5 Tehniline analüüs	34
5.1. Mudelite koostamine ja modelleerimise lähtekohad	34
5.1.1. Ülekandevõrk	34
5.1.2. Veurid	42
5.1.2.1. Veurite karakteristikud	42
5.1.2.2. Veuride modelleerimismudel	44
5.1.3. Kontaktvõrk	45
5.2. Simulatsioonistsenaariumid	48
5.2.1. Elektriliinide ülekandevõimsus	48
5.2.2. Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitus	49
5.2.3. Veurite regeneratiivne pidurdamine	49
5.2.4. Pingesümmeetria	50
5.2.5. Toitepiirkondadeülene liikumine	51
5.3. Tulemused ja tähelepanekud	51
5.3.1. Elektriliinide ülekandevõimsuse hinnang	51
5.3.2. Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse mõju	52
5.3.3. Veurite regeneratiivsest pidurdamisest tingitud mõju	53
5.3.4. Pingesümmeetria mõju ülekandevõrgule ja generaatorite talitlusele	54
5.3.5. Toitepiirkondadeülese liikumise mõju	55
5.3.6. Mõjud ülekandevõrgu teistele tarbijatele	56
Kokkuvõte	58
Kirjandus	60

Eessõna

Käesolev toimetis on Eleringi teadus- ja arendustegevuse raames aastatel 2012–2014 valminud teadustöö „Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele“ aruanne, mis käsitleb kokkuvõtlikult elektriraudtee olemust ja selle mõju elektrisüsteemile. Teematika on Eestis aktuaalseks muutunud seoses *Rail Balticu* projektiga ning sellest tulenevalt on töö tulemustel lisaks teaduslikule väärtusele ka otsene praktiline väärtus. Teadustöö raames on välja töötatud mitmeid uusi meetodeid ja mudeleid, mida kasutades on võimalik analüüsida elektriraudtee tehnilist mõju elektrisüsteemile. Samuti on teadustöö alusel avaldatud mitmeid teadusartikleid.

Teadustöö erinevatel etappidel osalesid Eleringi poolelt Jako Kilter, Mart Landsberg ja Kalle Kukk, TTÜ elektroenergeetika instituudi poolelt Ivo Palu, Tanel Sarnet, Triin Kangro, Tarmo Rähmõnen, Jelena Šuvalova, Jaan Niitsoo, Mari Andresen, Elsa Lepp ja Mari Löper ning TTÜ elektrotehnika instituudi poolelt Argo Rosin ja Tanel Jalakas.

Autorid tänavad ka teisi Eleringi ja TTÜ töötajaid ning partnereid, kes olid teadustöö tegemisel toeks nii heade ideede kui ka kommentaaridega.

Sissejuhatus

Elektrisüsteemi talitluse plaanimisel, juhtimisel ja analüüsimisel on olulise tähtsusega selle erinevate komponentide talitlemise mõistmine ja korrektne modelleerimine. Tähtsaim mõju on koormusel, kuna teadupärast on elektrisüsteemide peamine eesmärk elektrienergia ülekandmine tootmisüksustelt tarbijateni ning seetõttu võib öelda, et ilma koormuseta ei ole võimalik elektrisüsteemi talitlemine. Talitluse iseloomu määravad veel täiendavad tegurid nagu elektrivõrgu konfiguratsioon, reaktiivvõimsuse kompenseerimine, tootmisüksuste koosseis ja paiknemine jm. Tavapäraselt käsitletakse koormusi üldlevinud mudelitega, mis arvestavad nende staatilisi ja dünaamilisi omadusi. Käesolevas töös on vaatluse all tarbija, mis omadustelt on tavapärastest elektrisüsteemi koormustest mõnevõrra erinev, mistõttu on selle iseärasusi elektrisüsteemi talitluse modelleerimisel ja analüüsimisel tarvis arvestada.

Elektriraudtee temaatika on järjest enam päevakorrale tõusnud seoses *Rail Balticu* projekti arengutega. Seda tüüpi kiirraudtee liitumine toimub elektrisüsteemiga üldjuhul 110 kV pingel, mistõttu on võrguoperaatoril oluline teada sellise koormuse omadusi, et seda elektrivõrgu plaanimisel ja juhtimisel adekvaatselt arvestada. Elektriraudtee peamiseks iseärasuseks võrreldes teiste koormustega on asjaolu, et üldjuhul ühendatakse seda tüüpi koormus kahe faasi vahele, mistõttu põhjustab see ülekandevõrgus pinge asümmeetriat. Lisaks tuleb võrguoperaatoril arvestada ka harmoonikute ja pinge astmeliste muutustega. Kõik need kolm on olulised pinge kvaliteedinäitajad ning nende lubatav tase on määratletud vastavates standardites ja juhendites. Samuti tuleb arvestada võimalike kontaktvõrgu lühistega, regeneratiivse pidurdamisega ja elektriraudtee koormuse liikumisega ühest toitepiirkonnast teise. Seega tuleb võrguoperaatoril, kelle võrku elektriraudtee ühendatakse, nende eripäradega arvestada ning ette näha vajalikke parendavaid meetmeid. Eesmärgiks on kõikidele tarbijatele kvaliteetse elektrienergia tagamine.

Tulenevalt eelnevast on oluline tunda elektriraudtee olemust ja selle mõju elektrisüsteemile. Käesolev, ajavahemikus 2012–2014 valminud teadustöö kokkuvõtlik aruanne proovib anda sellele vastuse, koondades endas ülevaate elektriraudteesüsteemidest, nende tehnilisest mõjust ja modelleerimisest. Aruandes on kokkuvõtvalt esitatud elektriraudtee arengutega seotud suundasid nii Eestis kui ka Euroopas. Tehnilistest aspektidest vaadeldakse põhjalikult elektriraudtee mõjusid elektrisüsteemi talitlusele ja kvaliteedile. Olulise osa aruandest hõlmavad elektriraudtee matemaatiliste mudelite ja modelleerimisega seotud temaatikad. Aruande praktiline osa on seotud Eesti elektrisüsteemi 110 kV elektrivõrgu modelleerimisega ja analüüsiga. Kokkuvõtvalt antakse ülevaate tehnilistest aspektidest, millega võrguoperaator peab elektriraudtee liitumisel arvestama ning missugused on elektriraudtee liitumisel kaasnevad võimalikud mõjud teistele tarbijatele.

Teadustöö tulemusena on Eleringil tekkinud arusaam, kuidas mõjutab elektriraudtee elektrisüsteemi talitlust, missugused on peamised tegurid, millega tuleb arvestada ning mis on võimalikud meetmed sellist tüüpi tarbijate mõju vähendamiseks. Samuti on töö raames koostatud elektriraudtee kontaktvõrgu ja elektrivedurite matemaatilised mudelid ning modelleeritud Eesti elektrisüsteemi 110 kV elektrivõrk. Valminud uurimistöö teaduslikud tulemused on avaldatud rahvusvaheliste teadusartiklitena.

Käesolev Eleringi teadus- ja arendustegevuse uurimistöö aruanne käsitleb elektriraudtee liitumisega seotud tehnilisi aspekte ning ei vaatle majanduslikke küsimusi. Viimaseid käsitletakse eraldi teemana käesoleva uurimistöö järgnevates etappides.

1 Elektriraudtee areng

1.1.	Elektrirongide areng Eestis ja uued FLIRT-tüüpi elektrirongid.....	10
1.2.	Euroopa arengusuunad.....	10
1.3.	Investeeringud Läänemere piirkonna transpordisektorisse.....	11
1.4.	Projekt Rail Baltic.....	13

Ajalooliselt olid esimesed elektrifitseeritud raudteed oma tehniliselt lahenduselt madalpingelised alalisvoolul (DC – *direct current*) põhinevad süsteemid, kus vajalik toitepinge saadi tänu kasutusele olnud alalisvoolugeneraatoritele. Alalisvoolumasinad ja nendega seotud seadmed seadsid aga piirangud lubatavale pingele väärtusele, mistõttu oli limiteeritud ka raudteesüsteemides rakendatav pingele väärtus. Enam kui 100 aastat hiljem (elektrirongid tulid kasutusele 19. sajandi lõpus) on siiani kasutusele alalisvoolusüsteemil põhinevad elektrirongid, millele vajalik energia toodetakse läbi kolmefaasilisse süsteemi ühendatud alaldi. Tulemuseks on alalisvooluelektrirongidele sobiv pingele väärtus alates 650 V kuni 3 kV [1].

Niisuguse süsteemi korral tekib aga elektrienergia transportimisel suur pingele väärtuse langus ning esinevad üleliigsed kaod, mis on eriti tuntavad pikkade raudteeliinide korral. Seega on oluline, et raudteevõrk ning kolmefaasiline ülekandesüsteem asuksid teineteisele võrdlemisi lähedal. Toitepunktide tihedama paigutuse korral oleks küll võimalik tekkivat pingelangu kompenseerida, kuna aga toona puudus tihe elektrisüsteem, siis polnud ka kontaktliini toitepunkte võimalik tihedamalt ehitada. Sellest tulenevalt tekkis vajadus uue sobiva elektriraudtee toitesüsteemi leidmiseks, mis võimaldaks toitepunktide pikema vahemaid.

20. sajandi alguses leidis elektriraudteedel aset hüppeline areng, mil kasutusele võeti vahelduvvoolul (AC – *alternating current*) põhinev elektriraudtee toitesüsteem. Esmalt katsetati asünkroonmootoriga kolmefaasilist kontaktvõrgusüsteemi. Peagi selgus, et raudteesüsteemis osutub selle kasutamine keerukaks, seda esmalt kontaktõhuliinide ehituse tõttu, aga lisaks puudus ka võimalus vedurite kiiruse efektiivseks ning sujuvaks muutmiseks [2]. Ainus vahelduvvoolumootor, mis võimaldas kiiruse reguleerimist, oli ühefaasiline kommutatsioon-jadamähisega veomootor [1]. Seega pandi alus ühefaasilisele vahelduvvoolu elektriraudteesüsteemile. Kommutatsioon-elektrimootoril oli aga oluline puudus. Nimelt polnud need võimelised töötama võrgusageduslikul pingel (50 või 60 Hz), kuna indutseeritud pingele tõttu tekkis kommutaatoris harjaste vahele kustumatu kaarleek. Seetõttu tuli kasutatava sageduse väärtust vähendada 15 kuni 25 Hz piiresse.

Katsetati mitmesuguseid sageduse väärtusi ning rakendust leidis sageduse vähendamine 16,7 Hz peale, mis on 50 Hz võrgusagedusest 1/3. Kustumatu kaarleegi probleemi suudeti sellega vältida, kuid tulenevalt trafode ning mootorite isolatsiooni-koordinatsiooniprobleemidest tuli ka kasutatavat pinget piirata 15 kV-ga. Nii sätestatigi toona mitmes riigis kehtivaks vahelduvvoolul põhinev 15 kV 16,7 Hz elektriraudtee toitesüsteem [2; 3]. Sõltuvalt tehnoloogiast ja selle kättesaadavusest arenesid riigiti välja erinevad lahendused. Mõnel pool võeti kasutusele detsentraliseeritud süsteem, mis põhines kolmefaasilisse 50 Hz sagedusega ülekandevõrku ühendatud konverterjaamadel, tänu millele tagati toide ühefaasilisele madalamal sagedusel töötavale elektriraudteesüsteemile. Euroopa riikidest kasutasid sellist lahendust näiteks Norra ja Rootsi [2; 3]. Saksamaal, Austrias ja Šveitsis aga loodi eraldiseisev ühefaasiline toitesüsteem ainult elektriraudtee toiteks. Niisuguse lahendusele viidatakse kui tsentraliseeritud süsteemile. Eraldiseisev elektriraudtee energiasüsteem koosnes soojuselektrijaamadest, hüdroelektrijaamadest ning üldise elektrisüsteemiga ühendatud elektrimootoril ja generaatoril põhinevast konverterjaamast [2]. Seega lisaks tavapärasele kolmefaasilisele võrgusagedusel (50 või 60 Hz) talitlevale ülekandesüsteemile ehitati välja sellega paralleelne ühefaasiline, samuti võrgusagedusel talitlev energiasüsteem ainult elektriraudtee toiteks.

Vahelduvvoolul põhinev 15 kV 16,7 Hz elektriraudteesüsteem osutus aga võrdlemisi keerukaks. Tulenevalt paralleelsete energiasüsteemidega kaasnenud suurtest jooksvatest kuludest püüti välja töötada efektiivsemat elektriraudtee toitesüsteemi. Elavhõbealaldite kasutuskõlblike mudelite väljatöötamine enne Teist maailmasõda ning nende laialdasem kasutusele võtmine pärast sõda võimaldas kergelt tarbija lähedal vahelduvvool alalisvooluks muundada. Sellega pandi alus võimsate alalisvoolul töötavate vedurite loomisele ning ühtlasi ka süsteemisagedusel töötava ühefaasilise elektriraudteesüsteemi rajamisele. Esimesed katsetused selles vallas leidsid aset Saksamaal ja Prantsusmaal, kus välja töötatud vahelduvvoolul põhinev 25 kV 50 Hz süsteem osutus efektiivseks [2]. Ühtlasi oli see ka kergesti kasutusele võetav, kuna elektriraudtee kontaktvõrk oli oma põhimõttelt analoogne vahelduvvoolul põhineva 15 kV 16,7 Hz ja ka 3 kV alalisvoolusüsteemiga. Uus süsteem võimaldas kontaktvõrgu toitesüsteemi ehitamiseks rakendada juba elektrisüsteemis laialdaselt kasutatavaid komponente ning oli lihtsasti kasutusele võetav. Sellest tulenevalt muutus vahelduvvoolul põhinev 25 kV 50 Hz süsteem maailmas peamiseks elektriraudtee toitesüsteemiks.

Pärast Teist maailmasõda on enamik raudtee elektrifitseerimisi tehtud vahelduvvoolul võrgupingel. Ehituselt on tegemist lihtsa süsteemiga, kus elektritoide transformeeritakse trafode vahendusel kolmefaasilisest süsteemist ühefaasilisse süsteemi. Sellisele üleminekule on aga loomupärane kaasnev asümmeetria kolmefaasilise süsteemi pinge väärtustes. Tagamaks kolmefaasilises süsteemis koormuste sümmeetriat, rakendatakse elektriraudteesüsteemi jagamist sektsioonideks, kus iga sektsiooni toidetakse läbi kolmefaasilise süsteemi erineva faasi. Selline sektsioneerimine omab aga teatavaid puudusi. Esiteks on kolmefaasilise süsteemi toide oma loomult endiselt asümmeetriline. Teiseks, kuna iga sektsiooni toidab ainult üks trafo, siis peavad kõik elektriraudteesüsteemis paiknevad trafod olema dimensioneeritud vastavalt elektriraudtee maksimaalsele võimsusele. Lisaks eelnevale ei saa regeneratiivse pidurdussüsteemi rakendamisel regenereeritud võimsust kasutada naabersektsioonides liikuvate rongide toiteks [1]. Mainitud puuduste kõrvaldamiseks on kasutusele võetud mitmeid meetmeid. Näiteks erinevate mähisekonfiguratsioonidega eri tüüpi trafode rakendamist või nüüdsel ajal kasutust leidnud võimsustegurit parendavad muundurid [1].

Tänu kirjeldatud ajaloolisele arengule on tänapäeva elektriraudteedel laialdaselt kasutusel kolm põhilist elektriraudteesüsteemi:

- alalisvoolusüsteem;
- vahelduvvoolul põhinev 15 kV 16,7 Hz süsteem;
- vahelduvvoolul põhinev 25 kV 50 Hz süsteem.

Neist esimesed, alalisvoolu- ja 15 kV vahelduvvoolusüsteemid, on peamiselt kasutusel linnasisesel rööbastranspordil ja võrdlemisi lühikestel raudteeliinidel, kus peatuste vahemaad on väikesed ja sõidugraafik tihe. Vahelduvvoolul põhinev 25 kV 50 Hz süsteem on aga kõige levinum elektriraudteesüsteem pikki vahemaid läbivatel ning eelkõige just kiirraudteeliinidel, mis loovad transpordiühendusi suurte keskuste ja riikide vahel.

Vahelduvvoolusüsteemide eeliseks alalisvoolusüsteemide ees on samaväärse võimsuse kõrgematel pingetel edasikandmise võimalus, kasutades selleks väiksema ristlõikega juhte. Alalisvoolusüsteemide puhul rakendatakse lisarelsiga süsteemi, et vältida suurte läbimõõtudega juhtmeid kontaktvõrguliinidel. Lisaks vajab alalisvoolusüsteem võrreldes vahelduvvoolusüsteemiga rohkem veoalajaamu (kuni 8 korda) [4]. Teisest küljest on alalisvoolusüsteemis kasutatavad vedurid oma tehnoloogialt lihtsamad ja ehituselt kergemad.

Algselt mootoritel põhinevaid konverterjaamadega süsteeme püütakse tänapäeval järk-järgult moderniseerida, asendades need jõuelektroonikal põhinevate konverterjaamade vastu. Perspektiiviks on vahelduvvoolul põhineva 15 kV 16,7 Hz süsteemi toide täielikult üle viia jõuelektroonikal põhinevatele konverterjaamadele. Seeläbi on võimalik lihtsustada elektriraudtee energiasüsteemi ja vähendada kadusid, tõstes seega kogu riiklikku energiaefektiivsust [2; 3].

1.1. ELEKTRIRONGIDE ARENG EESTIS JA UUED FLIRT-TÜÜPI ELEKTRIRONGID

Eesti raudtee ja rongide areng on tulenevalt poliitilisest kuuluvusest sõltunud selle valdkonna arengusuundadest Venemaal. Täna sel päeval sõidavad Eesti raudteedel uued FLIRT (*Fast Light Innovative Regional Train*) tüüpi rongid, kuid veel 2013. aastal võis Eesti raudteedel näha sootuks teistsugust vaatepilti.

Nagu teistel aladel, mis olid Venemaaga liidetud, sai ka Eestis raudteede areng esmalt alguse kitsarööpmelisest raudteest. 19. sajandi lõpus leidis Euroopas aset intensiivne raudteede areng, kuna aga laiarööpmelise raudtee ehitus ja eksploatatsioon oli võrdlemisi kallis, leiti alternatiiv odavama juurdeveoraudtee ehitamises, millega lahendati väiksemate piirkondade kaupade ja reisijate liikumise vajadus. Rajatud juurdeveoraudteedel oli rööpmelaiuseks 750 mm ning neid kasutati ka teistel Venemaa režiimi alla kuulunud aladel [5].

Hilisemal juurdeveoraudteede likvideerimisel nõukogude võimu poolt ning laiarööpmelise raudtee kasutuselevõtul sai standardseks rööpmelaiuseks 1520 mm, mis on Eestis kasutusel tänaseni. See erineb aga Mandri-Euroopas kasutusel olevast standardsest 1435-millimeetrise rööpmelaiusest. Eestiga analoogselt on rööpmelaius Euroopa standardist veidi laiem ka Soomes ja Valgevenes. Tulenevalt Eesti peamiselt idasuunalisest raudteeühendusest pole kasutatava rööpmelaiuse erinevus seni probleemiks olnud.

Eesti raudteel veel hiljaaegu nähtud (kuni 2014. aastani) rongid ER2 olid aastatel 1962–1984 toodetud Riia tehases Rigas Vagonbūves Rūpnīca (RVP) [6]. Võttes arvesse rongide planeeritud eluiga (28–35 aastat) ning selle pikendamise võimalusi (üks kord ja maksimaalselt 15 aastat), on ilmselge, et senini kasutusel olnud rongid (vanimad aastast 1968) olid amortiseerunud [6]. Sellest tulenevalt osutus vajalikuks nõukogudeaegsete rongide väljavahetamine. Esimesed FLIRT-tüüpi rongid ilmusid Eestis raudteedele 2014. aasta juulis.

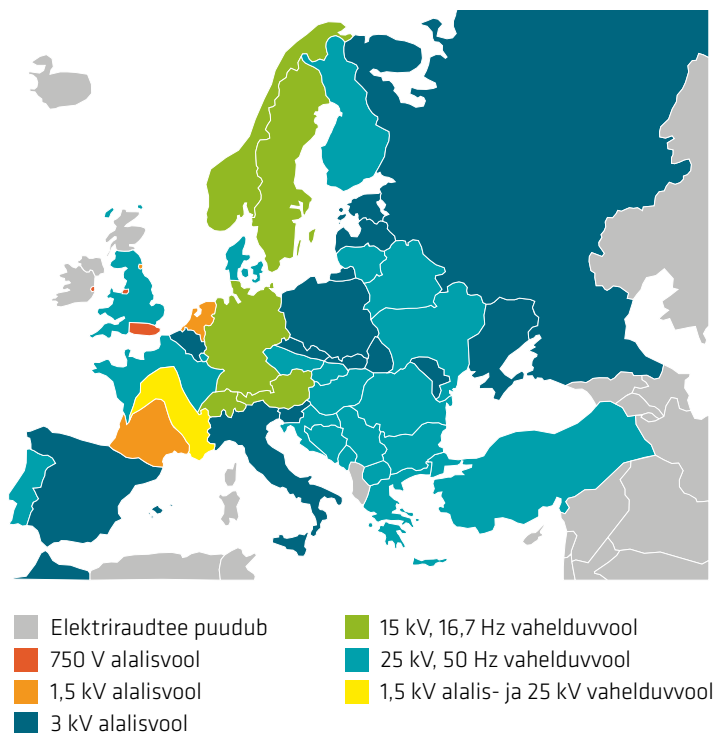
FLIRT-tüüpi rongid loodi 2000. aastal Šveitsis ning tänaseks on need kasutusel ka Saksamaal, Itaalias, Ungaris, Poolas, Norras ja Soomes. Rongitüübi omapäraks on trammidest tuntud vagunit ühendus, nii et terve rong on kui üks pikk vagun ning rongis ette ja taha liikudes ei tule enam läbida tambureid. Automaatsed ühendussõlmed vedurite esiootsas võimaldavad kuni neli rongi üheks veeremiks ühendada [7]. FLIRT-rongide maksimumkiirus on olenevalt rongist 120 kuni 200 km/h. Tänu õhkvedrustusele on FLIRT-rongid suhteliselt vibratsioonivabad ning vaiksemad Eesti raudteel seni sõitnud rongidest [7].

Aastatel 2013–2014 vahetati välja kogu senine Eesti reisirongipark ning tänaseks liigub Eesti raudteel 38 FLIRT-tüüpi reisirongi, millest 18 on elektri- ning 20 diislrongi [8]. Eesti FLIRT-tüüpi rongidel on mitmeid tehnilisi uuendusi. Näiteks salvestatakse neljavagunilise diislrongi pidurdamisel vabanev energia, mida kasutatakse varuenergiana kiirendamisel ja mis võimaldab hoida madalaid energiakulusid. Selleks on rongidel dubleeritud superkondensaator-elektrimootorite süsteem, mis kogub pidurdusenergiat ja lisab selle kiirendusel mootoritele. Pidurdusenergiat ei lasta kaotsi ka kasutusel olevates elektrirongides, kus pidurdamisel toimivad elektrimootorid generaatoritena ning rong suunab saadud energia tagasi süsteemi. Eestis kasutusel olevate veomootorite nimivõimsused on diislrongidel 350 kW ja elektrirongidel 500 kW [7].

1.2. EUROOPA ARENGUSUUNAD

Lähtuvalt riigiti esinenud arengusuundadest ning tehnoloogia kättesaadavusest, on nii maailmas kui ka Euroopa-siseselt elektriraudteedel kasutusel palju erinevaid toitesüsteeme, nii vahelduv- kui ka alalisvoolu nimipingetel töötavaid süsteeme. Joonis 1.1 kajastab Euroopa elektriraudtee kontaktvõrkude toitesüsteemide kaarti. Jooniselt on näha, et näiteks Rootsis, Norras, Saksamaal, Šveitsis ja Austrias on kasutusel vahelduvvoolul põhinev 15 kV 16,7 Hz süsteem. Suurem osa Hispaaniast, Itaalia, Tšehhi, Poola, Balti riigid ja osaliselt ka Venemaa kasutab 3 kV alalisvoolusüsteemi. Mõnel pool on veel töös vanemad pingesüsteemid, nagu alalisvoolul põhinevad 1,2 ja 1,5 kV süsteemid. Suur osa Euroopast rakendab elektriraudteedel aga vahelduvvoolul põhinevat 25 kV 50 Hz süsteemi, seda nii põhisisüsteemina kui ka üksikutel elektrifitseeritud lõikudel.

Joonis 1.1.
Elektriraudtee
kontaktvõrkude
nimipinged Euroopas [9]



Alljärgnevas tabelis 1.1 on toodud elektriraudtee pikkused Eesti lähiriikides koos nendes rakendatavate elektriraudtee toitesüsteemidega.

Tabel 1.1.
Elektriraudteeliinide
kogupikkus, kontaktliinis
kasutatav toitesüsteem
[10]

Riik	Aastal 2001 (km)	Aastal 2005 (km)	Aastal 2010 (km)	Toitesüsteem
Saksamaa	19 119	19 857	20 497	15 kV AC 16,7 Hz
Eesti	131	130	132	3 kV DC
Läti	257	257	257	3 kV DC
Leedu	122	122	122	25 kV AC 50 Hz
Poola	11 965	11 884	11 916	3 kV DC
Soome	2 400	2 617	3 073	25 kV AC 50 Hz

1.3. INVESTEERINGUD LÄÄNEMERE PIIRKONNA TRANSPORDISEKTORISSE

Ajavahemikul 2007–2013 tehtud riiklikud investeeringud Läänemere piirkonna transpordisektorisse olid ligikaudu 95,5 miljardit eurot, millest enamuse (80%) said Poola, Rootsi ja Saksamaa. Mainitud summast hinnanguliselt 57% on läinud maanteedehituseks ja 28% raudtee taristutesse. Ülevaate investeeringute mahust riikide kaupa annab tabel 1.2. Investeeringud transpordisektorisse on alates 2003. aastast olnud aina tõusvas joones [11].

Tabel 1.2.
Investeeringud
transpordisektorisse
aastatel 2007–2013 [11]

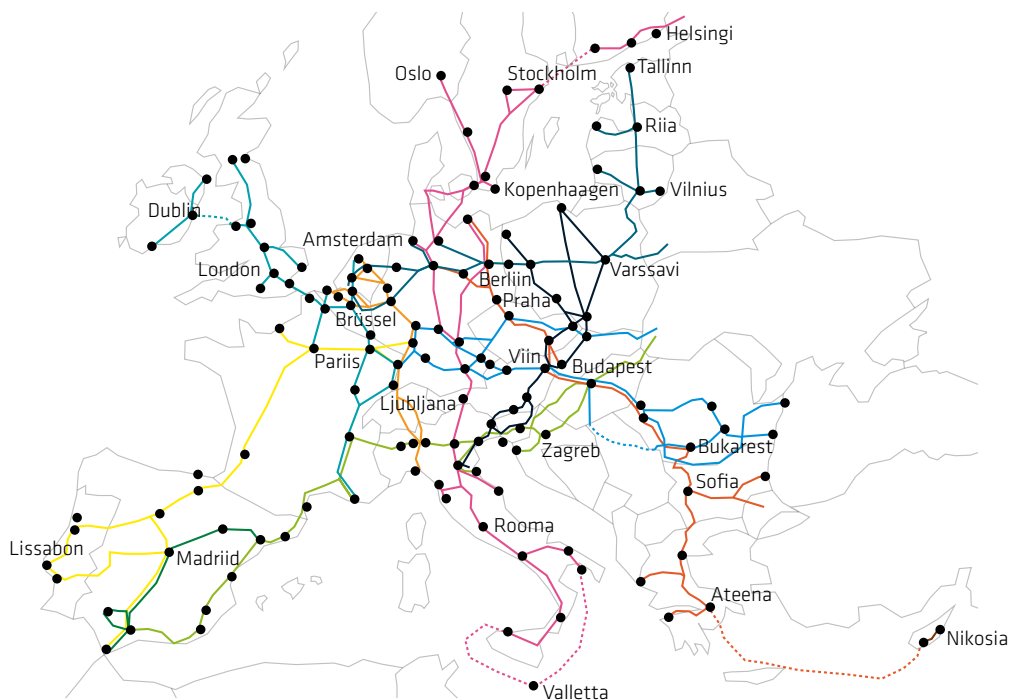
Riik	Raudtee (mld €)	Maanteed (mld €)	Sadamad (mld €)	Lennujaamad (mld €)	Kokku (mld €)
Poola	6	23	1	1	31,00
Rootsi	12	16,40	-	0,40	28,80
Saksamaa	5,50	4,37	6,20	0	16,07
Venemaa	1,20	4,50	2	0,40	8,10
Soome	0,50	1,30	0,35	0,35	2,50
Norra	0,20	1,46	0,07	0,14	1,88
Läti	0,55	0,80	0,32	0,53	2,20
Eesti	0,39	1,12	0,16	0,08	1,75
Leedu	0,70	0,69	0,12	0,05	1,57
Taani	-	1,02	-	-	1,02
Island	-	-	-	-	0,30
Kokku	27	55	10	3	95,18
Osakaal %	28	57	11	3	100

Euroopa Liidu 28 liikmesriigil on kokku enam kui viis miljonit kilomeetrit kattega maanteed ning 213 000 kilomeetrit raudteid, millest suurusjärgus 110 000 kilomeetrit on elektrifitseeritud [12]. Üle-euroopaline transpordivõrgustik TEN-T (*Trans-European Transport Network*) hõlmab endas 95 700 km maanteed, 106 000 km raudteeühendusi, millest 32 000 km on kiirraudteed, lisaks veel 13 000 km siseveoteid, 411 lennujaama ja 404 sadamat. Suurem osa nendest on juba välja ehitatud, kuid peaaegu 20 000 km maanteed ja üle 20 000 km raudteid on veel ehitamata või vajavad oluliselt uuendamist. Nende planeeringute hinnanguliseks maksumuseks on 500 miljardit eurot, millest ainuüksi prioriteetsete projektide (sh *Rail Baltic*) maksumus on 250 miljardit eurot [13].

TEN-T-i eesmärk on luua võrgustik, mis kätkeb endas teid, sõidukeid ja innovaatilisi süsteeme turvaliseks ja efektiivseks transpordiks. Eesmärgi teostus on kavandatud kahetasandiliselt, nõnda et suurlinnu ja riike ühendav alusvõrgustik peab valmima 2030. aastaks ning seda täiendavad riigisisised võrgustikud aastaks 2050. Kogu valmiv võrgustik peab tagama kõikide Euroopa Liidu regioonide omavahelise ühenduse, kusjuures igast võimalikust asukohast peaks loodava transpordivõrgustikuni jõudmine aega võtma mitte enam kui 30 minutit [12].

Alusvõrgustik luuakse koridoride põhimõttel. Kaardistatud TEN-T-i transpordikoridore kajastab joonis 1.2. Esialgu on võrgustiku loomiseks kinnitatud 30 prioriteetsemat projekti, mis on enim tasuvad ning toetavad säästva transpordi arengut. Nendest 18 on seotud raudteede ehitamisega ja kolm nii raudteede kui maanteed rajamisega. Kõikide planeeritud projektide valmimise ajaks on aasta 2020. Joonisel 1.2 toodud Euroopa transpordiühenduste graafiline ülevaade sisaldab juba nii valminuid kui ka veel planeerimisjärgus olevaid ühendusi.

Joonis 1.2.
TEN-T-i koridoride
alusplaan [14]



Eelkõige Läänemere piirkonnale prioriteetsed projektid on alljärgnevad [12]:

- PP12 Põhjamaade raud- ja maanteekolmnurga koridor;
- PP27 *Rail Balticu* koridor: Varssavi–Kaunas–Rii–Tallinn–Helsingi.

Eestis nähakse peale *Rail Balticu* ette ka raudtee arendamise kava Tallinnast läbi Tartu Venemaale. Lätis on eesmärk luua head ühendused Ventspilsist Venemaale ja Valgevenesse. Leedus peaks ühendused loodama Kaunase ja Vilniuse ning Vilniuse ja Valgevene vahele [12]. *Rail Balticut* nähakse kui osa Läänemere ja Aadria mere piirkonna ühendusest. Peale selle, et Tallinnast oleks rongiga võimalik läbi Varssavi Berliini sõita, saaks võimalikuks ka läbi Varssavi Itaaliasse sõit. Selle projekti tulemusena loodetavalt toimima hakkavad raudteeühendused on järgmised:

- Helsingi–Tallinn–Rii–Kaunas–Varssavi–Katowice;
- Gdynia–Katowice;

- Katowice–Ostrava–Brno–Viin;
- Katowice–Žilina–Bratislava–Viin;
- Viin–Graz–Klagenfurt–Villach–Udine–Venezia–Bologna–Ravenna.

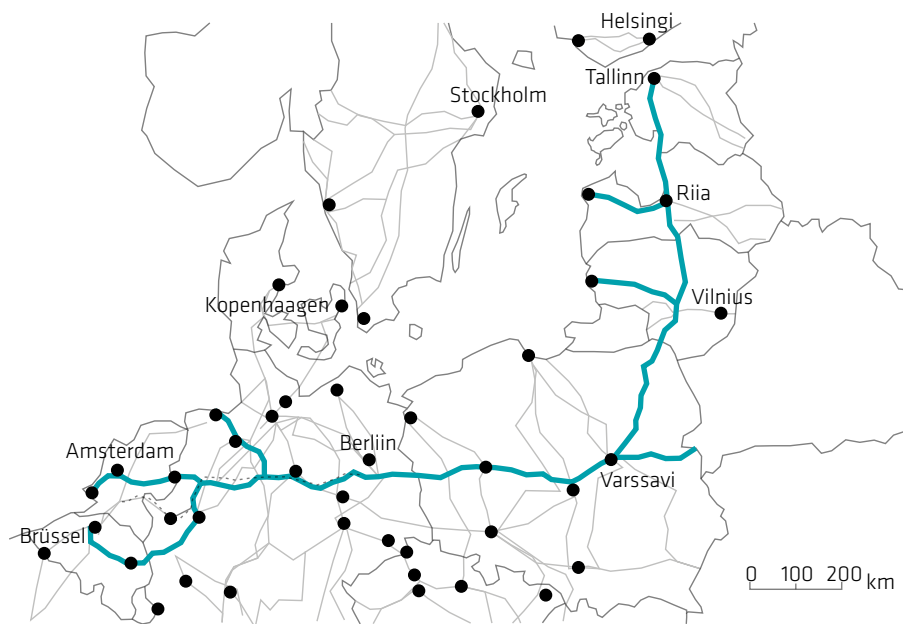
Kõnealuse transpordikoridori loomiseks on peale *Rail Balticu* plaanitud Austriasse Grazi ja Klagenfurti vahele ka täiesti uus 130 km pikkune ühendus, mille maksumus on hinnatud ligikaudu viiele miljardile eurole [15].

1.4. PROJEKT RAIL BALTIC

Rail Balticu projekti üldiseks eesmärgiks on taastada ühendus Balti riikide ja Euroopa raudteevõrgu vahel. Siiani on Balti riikide raudteesüsteem (rööpmelaius 1520 mm) Mandri-Euroopa standarditega (rööpmelaius 1435 mm) ühildamatu. Euroopa Komisjon on otsustanud (Euroopa Komisjoni otsus nr 884/2004, 29. aprill 2004), et Eesti, Läti ja Leedu riigi raudteeliiklus tuleb täielikult integreerida laiemasse Euroopa raudteetranspordisüsteemi. *Rail Baltic* on Euroopa Liidu üleeuroopalise transpordivõrgu (TEN-T) üks prioriteetsemaid projekte, mille idee esitati esmakordselt 1994. aastal ühises poliitilises dokumendis „Visioon ja strateegiad Läänemere ümber, 2010” kui Läänemere regiooni arengu oluline element [16].

Rail Baltic on läbi Läti ja Leedu Eesti pealinna Tallinnat ja Poola pealinna Varssavit ühendav raudteeprojekt (joonis 1.3), mille strateegiline uuring viidi läbi Euroopa Komisjoni regionaalpoliitika tellimusel 2005. aasta novembrist kuni 2006. aasta detsembrini [17]. Läbiviidud uuring hindas nii üldisi vajadusi kui ka potentsiaali *Rail Balticu* projekti arendamiseks ning andis soovitusi arendusvõimaluse rakendamiseks trassi paiknemise, tehniliste standardite ja korralduse osas [17].

Joonis 1.3.
Kavandatud *Rail Balticu* raudteetrass on üheks osaks Euroopa Liidu transporditaristu TEN-T võrgustikust [16]



Esiteks, nagu juba eespool mainitud, erineb Balti riikides raudteel kasutusel olev rööpmelaius ülejäänud Euroopa Liidu riikides kasutusel olevast. Teiseks kasutatakse praegu Balti riikides põhja-lõuna suunal olemasolevat raudteede võrku rahvusvaheliseks reisijate- ja kaubaveoks vähe, kuna see on halva kvaliteediga ning madala kiiruse ja teeninduse tasemega [17]. *Rail Balticu* projekt püüab luua turvalise, kiire ja kvaliteetse ühenduse Balti riikide ja Lääne-Euroopa suuremate majandus-, haldus- ja kultuurikeskuste vahel ning Poolas asuva keskuse kaudu ka teiste Euroopa Liidu riikidega [18]. Lisaks tagavad paranenud raudteeliinid tõhusama maismaaühenduse Balti riikide ja Põhjamaade (eelkõige Soome) vahel ning ulatuvad pikemas perspektiivis ka kaugemale Kesk-Aasiasse. Parenenud ühendus mõjub positiivselt keskkonnale, leevendab ummikuid Euroopa maanteedel, parandab ligipääsu Balti riikides ning võib kasu tuua projektis osalevate riikide regionaalarengusse [17].

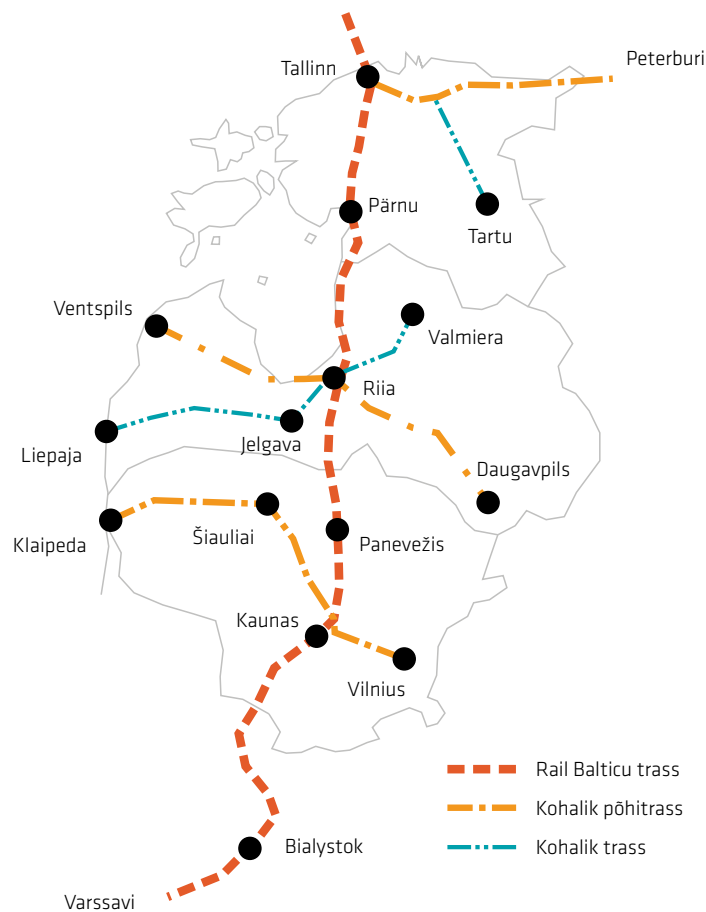
Lääne-Euroopat ühendava raudteesüsteemi kasutusele võtmiseks ja selle ühtlustamiseks ei piisa ainult rööpmelaiuse muutmisest Balti riikides. Raudteeliini töövalmiduse saavutamiseks on tarvis rakendada täiendavaid meetmeid ühtse ja toimiva süsteemi tagamiseks. Seoses *Rail Balticu* 1435 millimeetrise rööpmelaiusega raudteeliiniga kehtestatakse ka koostalitlusvõime direktiiv ja sellega seotud tehnilised koostalitlusnõuded (TSI) [16] kogu *Rail Balticu* projekti hõlmavas alas. Lisaks kolmele Balti riigile ka naaberpiirkondades Poolas ja Helsingis. Koostalitlusvõime direktiiv ja sellega seotud tehnilised koostalitlusnõuded on kavandatud selleks, et hõlbustada kogu Euroopa Liidu raudteesüsteemi „tehnilise ühtlustamise optimaalset taset” eesmärgiga parandada selle konkurentsivõimet, alandades näiteks tootmis-, vastuvõtmis-, tegevus- ja hoolduskulusid. Ühest küljest on eesmärgiks toetada rahvusvahelisi raudteeteenuseid ja teisest küljest luua ühised Euroopa Liidu eeskirjad vastavushindamiseks ning taristu, paiksete rajatiste ja sõidukite kasutuselevõtuks [18]. Peamised skeemiparameetrid on saadud uue TEN-T põhiraudteeliini põhjal, mis toimib kauba- ja reisijateveo raudteeliinina. TSI võtmeparameetrid on järgmised [18]:

- raudteeliini kategooria IV-M;
- ehitusgabariit GC;
- maksimaalne teljekoormus 25 tonni;
- maksimaalne kiirus raudteeliinil 240 km/h (lähtutakse raudteeliini tehnilisest lahendusest);
- maksimaalne rongi pikkus 750 meetrit.

Raudteesüsteemide ühtlustamisega kaasnevad mitmed lahendamist vajavad küsimused ning mahukad planeerimistööd. Lisaks rööbaste parameetritele on olulisel kohal ka nende geometria, kvaliteet ja vastupidavus. Kogu liini ulatuses peavad ka ooteplatvormid vastama ühesugustele nõuetele. Oluline on tagada elektriraudtee koormusele vastav energiavarustus. Selleks peab olemasolev elektrivõrk tagama piisava koguvõimsuse. Määratlemist vajavad raudteeliini toitealajaamade asukohad ja vajalikud ühendused. Ka veduri voluvõtu kvaliteet peab olema piisav, selleks on oluline saavutada hea ühendus pantograafi ja kontaktõhuliini vahel. Omavahel peavad kogu liini ulatuses ühilduma ka juhtkäsud ja signaalimine, seda nii rongil asuvatel süsteemidel kui ka raudteeäärsetel. Lisaks juba mainitule kaasneb raudteeliiklusega teatav müra, mille hindamine ja piirangute seadmine on keskkonna huve arvestades olulisel kohal. Kaubaveo ja teeninduse seisukohalt on vajalik ühtlustada teabesüsteemid ja järelevalve, sorteerimis- ja jaotussüsteemid ning tagada toimiv sidevahetus teist liiki veokitega. Liini ohutuse, töökindluse, kasutatavuse ja tehnilise ühilduvuse seisukohalt on oluline tagada liikluse korraldamine ja raudtee kasutamine, mistõttu on tarvis sellega tegelevat asutust ja personali. Detailsem ülevaade *Rail Balticu* koostalitlusvõime direktiivist ja selle võimaliku mõju analüüs on avaldatud 2011. aastal AECOM-i aruandes [18]. *Rail Balticu* arendus- ja teostatavusvõimalusi käsitlevad 2013. aastal läbi viidud keskkonnamõtjude strateegilise hindamise uuring [16] ja 2007. aastal koostatud teostatavusuuring [17].

Mainitud analüüside tulemusena leiti, et alternatiivsetest *Rail Balticu* trassi variantidest on eelistatum Tallinn–Pärnu–Rii–Panevežis–Kaunas–Varssavi. Kavandatud trassist annab ülevaate joonis 1.4. Kurvide ning kiirusepiirangute vähendamiseks õgvendatud uus 1435 mm rööpmelaiusega raudteeliin algab Leedu piirilt ning suundub Kaunasesse. Raudteeliin ei läbi Kaunase terminali otse, vaid kasutab Palemonase raudteejaama olemasolevat 1520 mm rööpmelaiusega raudteeliini transiidipunktina, et ühendada terminal ning bussijaama või 1520 mm rööpmelaiusega raudteeliiniga lennujaama teenindavate ühissõidukite peatus. Ka uus kavandatud ühendvedude rajatis asub samas piirkonnas ning seda on võimalik lihtsalt kõnealuse raudteeliini kaudu teenindada. Liin suundub põhja poole läbi Panevežise lääneosa, kus on kauba- ja reisijateveo peatus, ning läheb edasi põhja poole Lätisse. Lätis jätkub trass Iecava juures ning suundub Riia idas üle Daugava jõe Salaspilsi, kuhu on kavandatud ida-lääne ühendvedude transiidijaam. Riia linna teenindab uus 1435 mm rööpmelaiusega raudteeliin, mis kasutab terminali suunduvat vana Ergli trassi. Terminalist saabuavad rongid sõidavad sama raudteeliini pidi, et jõuda tagasi põhja-lõuna suunalisse põhilõiku. Sellest transiidipunktist jätkub raudteeliin põhja suunas paralleelselt Pärnusse suunduva *Via Baltica* maanteetrassiga, seejärel tuleb veel üks vahepeatus ning raudteeliin lõpeb Tallinnas Balti jaamas, kuid enne seda peatub rong ka Tallinna lennujaamas. Tallinna lähedusse ehitatakse haruliinid, mis viivad nii Muuga sadamasse kui ka Helsingi suunale kavandatud transiidipunkti [18].

Joonis 1.4.
Raudteeliin Tallinn-
Pärnu-Riia-Panevežis-
Kaunas-Varssavi [18]



Rail Baltica projektiga rajatava raudteeliini põhinäitajad on järgmised [18]:

- uue raudteeliini kogupikkus on 728 km
 - Eestis 229 km
 - Lätis 235 km
 - Leedus 264 km
- kavandatud maksimumkiirus 240 km/h;
- raudteeliin on ühendveoga harilik raudteeliin;
- sõiduaeg Tallinnast Leedu/Poola piirini (sõltuvalt peatuste arvust)
 - reisijatel 4 h 8 min
 - kaupadel 10 h 29 min
- keskmine kiirus
 - reisijateveol 170 km/h
 - kaubaveol 68 km/h
- reisijateveo teenust osutatakse iga kahe tunni järel ajavahemikus 6:00–24:00;
- uued või ajakohastatud reisijate peatused
 - Palemonases
 - Panevežises
 - Riia terminalis
 - Pärnus
 - Tallinna lennujaamas
 - Tallinnas Balti jaamas
- ühendvedude põhiterminalid Tallinnas, Riias ja Kaunases ning ühendvedude teisese terminalid Panevežises ja Pärnus;
- hooldusrajatised Raplas, Riias ja Jonavas;
- raudteeliin on uue trassi kogu pikkuses peamiselt kaherealine;
- mõned kahesuguse rööpmelaiusega (1520/1435 mm) vajaminevad lõigud.

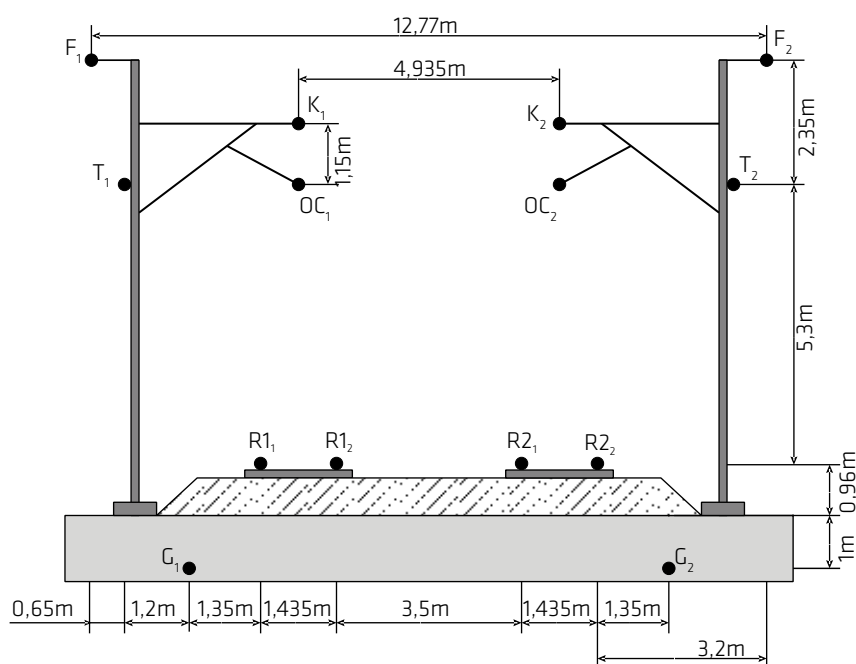
2 Elektriraudtee kontaktvõrgusüsteem

2.1.	Eesti 3 kV DC kontaktvõrk	17
2.2.	Kontaktvõrkude toitesüsteemid	17
2.2.1.	1x25 kV toitesüsteem	17
2.2.2.	2x25 kV toitesüsteem	18
2.2.3.	3/2x25 kV toitesüsteem	18
2.2.4.	1x25 kV ja 2x25 kV toitesüsteemi võrdlus	19
2.2.5.	Kontaktliinide auto- ja lisapingetrafod	20

Elektriraudtee elektritaristu koosneb üldistatuna elektrienergia muundamise ja ülekandmise seadmetest ning elektritarbijatest, millest suurimad on elektrirongid. Kontaktliin koos raudteerööbastega on ühendusviisiks elektrit tarbiva elektrirongi ning elektrienergia edasikandva elektrivõrgu ja muundusseadmete vahel (trafod, alaldid). Tulenevalt kasutatavast elektritranspordi pingesüsteemist ning lähtuvalt pingestmest eristatakse alalisvoolu- ja vahelduvvoolusüsteemides kasutatavaid kontaktvõrke.

Elektriraudtee kontaktvõrk on oluliselt keerulisem süsteem kui klassikaline ülekandeliin. Joonis 2.1 kujutab kahe rööppaariga elektriraudteetrassi kontaktvõrgu ristlõiget. Jooniselt on näha, et kontaktvõrgusüsteem sisaldab endas mitmeid erinevatel vahekaugustel paiknevat, erineva ristlõike ja potentsiaaliga paralleelseid juhte. Nende hulka kuuluvad ka maandatud raudteerelsid. Seesugusest omapäras tulenevalt tekib juhtide vahel vastastikune induktiivsus ja mahtuvusjuhtivus, mis mõjutavad oluliselt kontaktvõrkude käitumist nii normaaltingimustes kui ka häiringute korral. Kontaktvõrk on ühefaasiline süsteem, mistõttu tekkival vastastikusel induktiivsusel ja mahtuvusel puuduvad sümmeetrilised, üksteist kompenseerivad komponendid. Seega ei saa kontaktvõrkude puhul teha tavapäraseid elektrivõrkude ülekandeliinide korral tehtavaid üldistusi ja lihtsustusi. Need asjaolud teevad ühtlasi ka kontaktvõrkude modelleerimise keerukaks ja töömahukaks protsessiks.

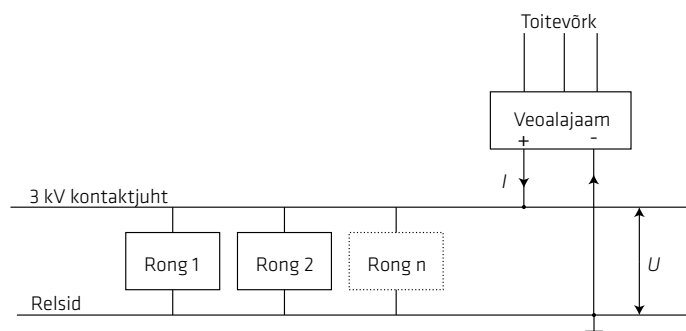
Joonis 2.1.
Kontaktliini juhtide
geomeetiline paiknemine
raudteeliinil
F-abitoteeliin,
OC-kontaktõhuliin,
K-kandujuhe,
G-maandusjuhe,
T-tagasivoolujuhe,
R-relsid



2.1. EESTI 3 KV DC KONTAKTVÕRK

Eestis kasutab elektriraudtee hetkel 3 kV alalispinget kontaktvõrgus, mille lihtsustatud plokk skeem on kujutatud joonisel 2.2. Rongi tarbitav vool võib muutuda suures ulatuses, sõltudes nii rongi kiirusest, kiirendusest, täituvusest aga ka aastaajast (vagonite kütmiseks vajaminev energia).

Joonis 2.2.
Kontaktliini liinilõigu
lihtsustatud plokk skeem



Nii elektriraudtee kontaktliini antav elektrienergia pinge ja selle kvaliteet (EN 50163) kui ka kontaktliini poolne mõju elektrivõrgule (EN 50121, EN 55011) on määratletud standarditega. Reglementeeritud on ka kontaktliinist energia tarbimine elektrirongide veomuundurite ning abitoitemuundurite poolt (EN 50155, EN 61287).

2.2. KONTAKTVÕRKUDE TOITESÜSTEEMID

Elektriraudteedel on maailmas kasutusel mitmeid erinevaid toitesüsteeme ja kontaktvõrgu lahendusi. Kontaktvõrgu peamiseks eesmärgiks on tagada elektrirongidele vajalik elektrienergia ülekanne. Kasutusel olevaid kontaktvõrkude toitesüsteemide lahendusi defineeritakse veolajaamadadesse paigaldatud trafode kaudu. Veolajaamade funktsiooniks on võrgust saadav toitepinge konverteerida veojõusüsteemile sobiva pinge ja sagedusega nimiparameetritele, misjärel see edastatakse läbi kontaktliinisüsteemi tarbijale ehk rongile. Raudteede elektrifitseerimisel on põhi- ja linnalähedastel liinidel üle maailma saanud standardseks vahelduvvoolu nimipinge 25 kV sagedusel 50 Hz. Näiteid sellise süsteemi rakendamise kohta võib tuua kõigjalt Euroopast, aga ka mujalt maailmast, näiteks Indiast ja Hiinast [19–21]. Sel puhul tagatakse rongidele elektritoide kolmefaasilisest ülekandesüsteemist, mis on oluliselt kõrgema elektrienergia edastamise efektiivsusega kui madalamatel pingetel põhinevad toitesüsteemid.

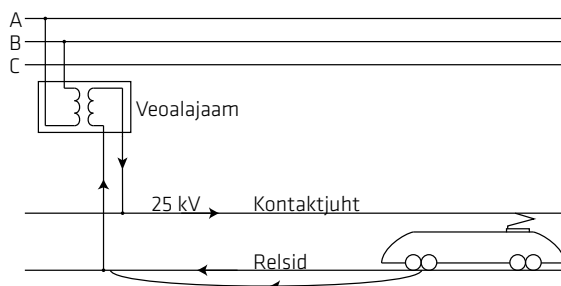
Elektrirongid on ühefaasilised tarbijad ja neile vajamineva elektrienergia konverteerimiseks kolmefaasilisest ülekandevõrgust on mitmeid moodsaid. Vahelduvvoolu kontaktvõrgusüsteemid jagunevad kolme põhirühma järgmiselt:

- 1x25 kV toitesüsteem (otsetoitega süsteem);
- 2x25 kV toitesüsteem (autotrafodega süsteem);
- 3/2x25 kV toitesüsteem (eri tüüpi trafoühendusega süsteem).

2.2.1. 1x25 kV toitesüsteem

Lihtsaimaks kontaktvõrgu toitesüsteemiks on ühefaasiline nn otsetoitesüsteem, kus veolajaama on paigaldatud ühefaasiline trafo. Sellest tulenevalt tähistatakse seda süsteemi kui 1x25 kV süsteemi. Veolajaama trafo primaarmähis ühendatakse ülekandesüsteemi kahe faasi vahele ning sekundaarmähis kontaktliinijuhile ja relsi vahele, nagu on näha joonisel 2.3.

Joonis 2.3.
Kontaktvõrgu 1x25
kV toitesüsteem
läbi ühefaasilise
trafoühenduse



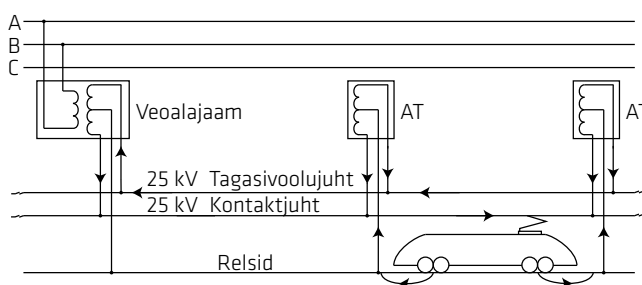
Kontaktvõrgus rakendatavad trafod mõjutavad nii rongile edastatava veojõu efektiivsust kui ka ühefaasilisest koormusest (rong) tulenevate probleemide kandumist kolmefaasilisse ülekandevõrku. Elektriraudteeliinide korral pole tegemist püsivate tarbijatega, mistõttu peavad veolajaamadesse paigaldatavad trafod taluma suurt koormuste varieerumist. Tulenevalt raudteeliinide kõrgest varustuskindlusnõudest, peavad trafod vastu pidama kõikvõimalikele välistele mõjudele (lühistele) [22], kuna kontaktliinide näol on tegemist pikkade rikkealtide õhuliinilõikudega. Ühefaasilise trafo rakendamine veolajaamas on küll kõige lihtsam lahendus, aga paraku toob see endaga kaasa asümmeetrilise olukorra ülekandesüsteemi faaside vahel [23]. Joonisel 2.3 kujutatud ühefaasilise trafo ühendusskeemilt kontaktvõrgu ja ülekandesüsteemi vahel on näha, et tulenevalt trafo primaarmähise ühendamise kahe ülekandesüsteemi faasi vahele (A ja B) jääb üks faas kogu kolmefaasilisest süsteemist koormamata, mis põhjustab asümmeetrilise olukorra ülekandesüsteemis.

2.2.2. 2x25 kV toitesüsteem

Elektrienergia ülekande kvaliteedi parendamiseks on kontaktvõrgus kasutusele võetud täiendava tagasivoolujuhi ehk negatiivse fiidri lisamine ja autotrafode rakendamine veolajaamas. Tänu ühefaasiliste trafode asendamisele autotrafodega saadakse alajaama sekundaarpinge väärtuseks 50 kV. Saadud pinge väärtus jaotatakse omakorda kontaktliini- ja tagasivoolujuhi vahel. Sellest tulenevalt saadakse 2x25 kV toitesüsteem.

Veolajaama paigaldatav autotrafo (AT – *auto transformer*) erineb ühefaasilisest trafost oma sekundaarmähisel paikneva keskväljavõtte poolest. Tänu selle iseloomulikule ehitusele on autotrafo sekundaarmähist võimalik ühendada kontaktliinijuhi ja sellega paralleelselt kulgeva tagasivoolujuhi vahele ning trafo keskväljavõtte raudteerelssidele. Trafo ülekandesuhe kontaktliinijuhi ja tagasivoolujuhi vahel on 1:1, kuid tänu relssidega ühendatud keskväljavõttele on rongile edastatav pinge poole väiksem (25 kV).

Joonis 2.4.
Kontaktvõrgu 2x25 kV
toitesüsteem autotrafode
paigaldamisega
kontaktliinil



2x25 kV kontaktvõrgu toitesüsteemi põhimõtet kirjeldab joonis 2.4. Rongile vajaminev energia edastatakse vastavalt veolajaama ja autotrafo sektsioonile, milles rong sel hetkel liigub. Paraku toob trafoühenduse rakendamine kaasa asümmeetria ülekandesüsteemi faaside vahel, kuna trafo primaarmähis on samuti nagu ühefaasilisel trafol ühendatud kolmefaasilise ülekandesüsteemi kahe faasi vahele.

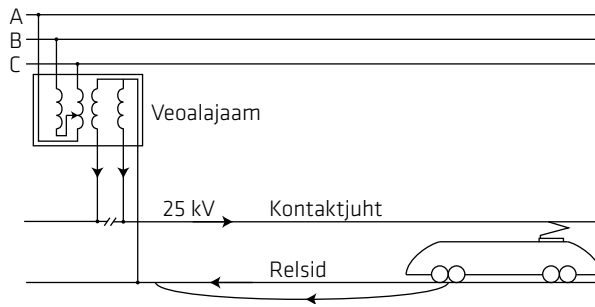
2.2.3. 3/2x25 kV toitesüsteem

Vähendamaks elektriraudtee koormuse omapärast tulenevaid mõjusid, on veolajaamades kasutust leidnud eri tüüpi trafoühendused. Sellisel juhul konverteeritakse kolmefaasiline toitepinge kontaktvõrgus kahte ühefaasilisse vooluringi. Sellest tulenevalt nimetatakse niisugust lahendust 3/2x25 kV toitesüsteemiks. Rakendatavaid trafoühendusi on mitmeid, millest enamik tugineb sarnasele tööpõhimõttele. Kontaktvõrgus on efektiivsemateks ning seega ka enim levinuks osutunud *Scott*- ja *V*-ühendusega trafod. Veolajaama paigaldatav trafoühendus võimaldab vähendada ülekandesüsteemi pingete vahel tekkivat asümmeetriat, mistõttu veolajaamas rakendatav trafolahendus omab suurt mõju süsteemi efektiivsusele.

Scott-trafo

Maailmas enim kasutust leidv eritüüpi trafoühendus kontaktvõrgusüsteemis on *Scott*-trafo [22], mis konverteerib ülekandevõrgust kolmefaasilise toite kaheks ühefaasiliseks. Kasutades selleks kahte ühefaasilist trafot – keskväljavõttega põhitrafo ja *teaser*-vahetrafo [22; 24]. Põhitrafo ühendatakse ülekandesüsteemi kahe faasi vahele, vahetrafo aga põhitrafo keskväljavõtte ja süsteemi kolmanda faasi vahele [20]. Tänu sellisele lahendusele on elektriraudtee koormusega koormatud kõik kolm ülekandesüsteemi faasi. *Scott*-trafo tööpõhimõtet kontaktvõrgu toitesüsteemis kirjeldab joonis 2.5. *Scott*-trafo on leidnud laialdast kasutust tänu oma lihtsale ehitusele, kergele koormuspinge reguleerimisele ja kolme faasi vahelise asümmeetria vähendamisele. Tegemist on aga kahest trafost koosneva ühendusega, mistõttu on see oma parameetritelt suurem ning nõuab enam investeeringuid.

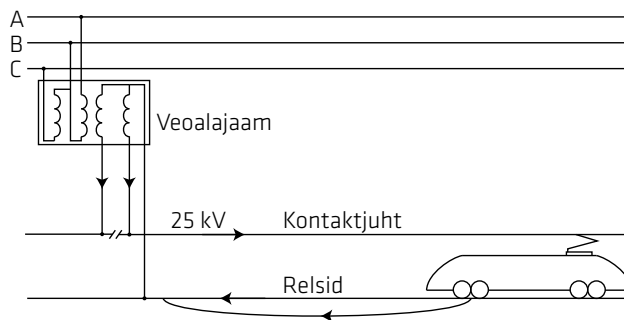
Joonis 2.5.
Kontaktvõrgu 3/2x25 kV
toitesüsteem Scott-trafo
rakendamisel



V-ühendusega trafo

Scott-trafoga sarnane trafoühendus on V-ühendusega trafo, mis koosneb samuti kahest ühefaasilisest trafost. V-ühendusega trafo konverteerib kolmefaasilise ülekandetoite kontaktvõrgusüsteemis kaheks ühefaasiliseks, mis on omavahel 60° faasinihkes [22]. V-ühendusega trafo tööpõhimõtet kontaktvõrgu toitesüsteemis kirjeldab joonis 2.6.

Joonis 2.6.
Kontaktvõrgu 3/2x25
kV toitesüsteem
V-ühendusega trafo
rakendamisel



V-ühendusega trafo eeliseks on efektiivne maksimaalse võimsuse rakendatavus veolajaama tarbijate toiteks. Trafo ühendamine on lihtne ja kulutused võrdlemisi väikesed. Normaaltalitluses on trafo primaarpoole jaotlas võimalik säilitada kolmefaasiline toide, mis võimaldab lisaks veolajaamale toita ka teisi sama piirkonna kolmefaasilisi tarbijaid. Suurimaks puuduseks osutub võimalik rikkeolukord, mille korral peab reservtrafo toitma mõlemaid kontaktvõrgu ahelaid, seni kui normaaltoide taastatakse. Rikkeolukorras talitleb veolajaam aga ühefaasilises ühenduses (1x25 kV süsteem), mis toob kaasa mittesoovitud vastujärgnevusvoolu väärtuse kasvu süsteemis [25].

Hoolimata eespool mainitud eri tüüpi trafoühenduste efektiivsusest ülekandevõrgu faaside asümmeetria vähendamisel, tuleb silmas pidada, et elektriraudtee koormusest põhjustatud pingete asümmeetria pole võimalik täielikult elimineerida. Välja arvatud mõningatel juhtudel, kui kontaktvõrgu koormus raudteeliini sektsioonides on täielikult võrdne. Paraku esineb sellist olukorda väga harva, kus eelduseks on elektriraudteeliinide tihe koormatus. Seega sõltub tekkinud asümmeetria sekundaarmähise koormuste suhtest. Mida võrdväärsemad on koormused trafo mõlemal mähisel ehk kontaktliini eri sektsioonides, seda väiksem on tekkinud pingete asümmeetria.

2.2.4. 1x25 kV ja 2x25 kV toitesüsteemi võrdlus

1x25 kV toitesüsteemi rakendamine on lihtne nii konfiguratsioonilt kui ka kaitse seisukohalt, koosnedes kontaktliinist ja tagasivooluahelast. Kontaktvõrgusüsteem saab toite kolmefaasilisest ülekandevõrgust läbi veolajaama ühefaasilise trafo. Selle süsteemi suurimaks miinuseks on tekkinud koormuste asümmeetria ja relsi-maa vaheline lekkevool. Sideseadmete häiringute põhiliseks põhjustajaks olevat lekkevoolu on võimalik kuni 20% ulatuses vähendada, lisades süsteemi täiendava tagasivoolujuhi. Paraku ei ole see enamasti piisav, vältimaks kommunikatsiooniliinide ja -seadmete häireid [26]. Lisaks on 1x25 kV toitesüsteemi puhul piiratud toitepunkti kaugus (ca 25 km), tulenevalt lubatavast pingelangu väärtusest liinides [20]. Ühefaasilist süsteemi eelistatakse enamasti neil juhtudel, kui raudteeliini koormus on väike ning puuduvad otsesed kehtestatud piirangud häiringutele ja elektrienergia kvaliteedile.

2x25 kV toitesüsteemis jagatakse veolajaama pinget kontaktliini- ja tagasivoolujuhi vahel. Raudteeliin on jagatud sektsioonideks, mida toidetakse liinile paigaldatud autotrafodega. Võimsust edastatakse rongile veolajaama ja veduri asukohale eelneva sektsiooni autotrafo vahelt. Kahe autotrafo vahelisel sektsioonil on rongi võimalik toita mõlemalt poolt, mistõttu on voolud liinis madalamate väärtustega.

Seega on ka häiringute tase ja pingekadu kontaktliinis madalam kui näiteks ühepoolse autotrafodeta toite korral. Saavutatud madalamad voolu ja pingekao väärtused võimaldavad kontaktliinides edastada suuremaid võimsusi, mis tõstab liinide töövõimet ja jõudlust. Teisest küljest nõuab niisugune kontaktvõrgusüsteemi rakendamine suuremaid kulutusi. Esiteks nii süsteemi autotrafode ja tagasivoolujuhi paigaldamise, aga ka kulukama releekaitse näol ning vastavalt kahele fiidril vajalike alajaamade ehituse tõttu [20]. Lisaks vajab 2x25 kV süsteem paigaldamisel ligi kaks korda suuremat maa-ala, võrreldes 1x25 kV süsteemiga, seega ei ole see rakendatav kitsastes tingimustes [27]. 1x25 kV süsteem nõuab raudteeliinile rohkem veolajaamu, kuid 2x25 kV süsteemis on trafode summaarne arv suurem (veotrafod ja autotrafod) [20].

2.2.5. Kontaktliinide auto- ja lisapingetrafod

Raudteeliini kontaktvõrgu konfiguratsiooni valikut mõjutavad kehtestatud piirangud pinge kvaliteedile ja häiringute tasemele. Elektriraudtee toitesüsteemi ülekande tõhustamiseks, aga eelkõige maaühendusvoolu ja elektromagnetilise häiringu vähendamiseks lisatakse kontaktvõrku lisapinge- ja autotrafod.

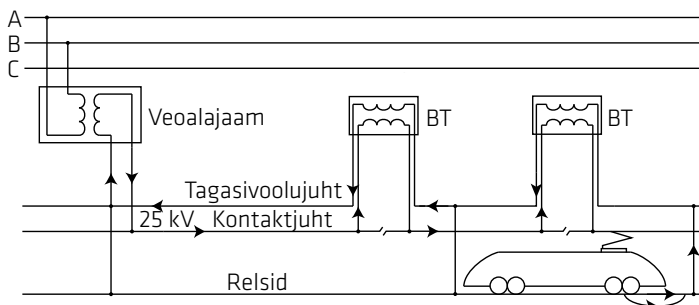
Lisapingetrafod (BT – *booster transformer*) võeti esimesena kasutusele Jaapanis ning pärast seda leidsid need rakendust ka Euroopa riikides, näiteks Suurbritannias, Rootsis ja vähemal määral ka Saksamaal [3]. Autotrafod lisati süsteemi esmalt USA-s, sealt levis see Jaapanisse ning veidi hiljem juba ka Austraaliasse ja Euroopasse [19].

Autotrafodel põhineva kontaktvõrgu toitesüsteemi tööpõhimõtet kirjeldab täpsemalt punkt 2.2.2 ja joonis 2.4, kus autotrafod ühendatakse teatava intervalliga (10–20 km) kontaktvõrku kontaktliini- ja tagasivoolujuhi vahele. Sellest tulenevalt peaks teoreetiliselt kogu vool kulgema kontakt- ja tagasivoolujuhis, mitte aga mööda raudteerööpaid, välja arvatud parajasti vedurile toidet tagava kahe autotrafo vahelises sektsioonis. Praktika on aga näidanud, et sellest hoolimata võib kuni 10% [20] koormusvoolust siiski ka vabas liinisektsioonis mööda rööpaid kulgeda.

Autotrafodega toitesüsteemi korral toimub energia edastamine kõrgemal pingest, tõstes seeläbi toitesüsteemi efektiivsust ning vähendades kadusid ning pingelangu alajaama ja rongi vahel. Sellest lähtudes on veolajaamade vahel võimalik rakendada suuremaid intervalle (60–65 km), mis on oluline elektrivarustuskindluse tagamiseks pikkadel raudteeliinidel ning piirkondades, kus jaotusliinid paiknevad võrdlemisi hõredalt [28]. Autotrafode vahekauguse määramisel on oluline arvestada ka võimalike trafo tööseisakutega. Trafod peavad kontaktliinis olema paigaldatud niiviisi, et rongile vajaminev minimaalne tööpinge oleks tagatud ka võimalike rikete korral [28]. Autotrafode rakendamine kontaktvõrgusüsteemis võimaldab paremat pinget reguleerimist ning aitab summutada häiringuid, kuna tagastuv vool liigub relsside asemel mööda tagasivoolujuhti [29].

Nagu autotrafodele, paigaldatakse kontaktvõrkudes õhuliini konstruktsioonile ka lisapingetrafod teatava intervalli (3–5 km) tagant. Lisapingetrafo primaarmähis ühendatakse üle isolatsioonivahemiku kontaktliinijuhiga ning sekundaarmähis tagasivoolujuhiga. Lisapingetrafodega kontaktvõrgu toitesüsteemi tööpõhimõtet kirjeldab joonis 2.7.

Joonis 2.7.
Kontaktvõrgu toitesüsteemi lisapingetrafode paigaldamisega kontaktliinil



Lisapingetrafode lisamisega kontaktliini vähendatakse oluliselt elektromagnetiliste häiringute taset võrgus, kuna kogu tagastuv vool suunatakse relssidelt tagasivoolujuhti, mistõttu indutseeritud pinget on väiksem. Häiringute vähendamine saavutatakse paraku aga kehva pinget väärtuse arvelt, kuna lisapingetrafode näol on tegemist lisatakistusega liinis [26].

Tänapäeval ei leia lisapingetrafod kuigi sagedast kasutust, kuna neil on rida erinevaid puudusi. Oluliseimateks on eelkõige suur trafode, tagasivoolujuhtide ja lülitite arv, mis toob kaasa suuremaid kulutusi

paigaldamisel ja rakendamisel. Lisaks vajab mitme relsipaariga liinide puhul iga relsipaar eraldi trafosid. Nagu juba mainitud, suureneb lisapingetrafode lisamisega liini takistus, mis toob kaasa suurenenud pingelangu ja täiendavad võimsuskao kontaktliinides. Lisapingetrafode rakendamisel nõuab olulist tähelepanu ka elektriikaare tekkimine pantograafi liikumisel üle kontaktliini isolatsioonivahemike. Viimane toob endaga kaasa juhtmete ja detailide kiire kulumise ja suurendab sagedushäiringuid. Lisaks on oluline mainida, et kahe lisapingetrafo vahelises sektsioonis, kust rong sel hetkel toidet saab, ei osutu elektromagnetiliste häirete vähendamine piisavalt tõhusaks [20].

Kokkuvõtvalt on auto- ja lisapingetrafodega kontaktvõrgusüsteemi eelised ja puudused esitatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1.
Auto- ja lisapinge-
trafodega kontaktvõrgu-
süsteemi võrdlus

	Lisapingetrafo (BT)	Autotrafo (AT)
EELISED	<ul style="list-style-type: none"> ▪ lekkevoolu vähendamine ▪ indutseeritud pinge vähendamine ▪ elektromagnetiliste häirete vähendamine 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ lekkevoolu vähendamine ▪ indutseeritud pinge vähendamine ▪ elektromagnetiliste häirete vähendamine ▪ pingelangu vähendamine rongi ja alajaama vahel ▪ võimsuskao vähendamine ▪ parem pinge reguleerimine ▪ võimaldab pikemaid vahemaid veoalajaamade vahel ▪ süsteemi kõrgem efektiivsus
PUUDUSED	<ul style="list-style-type: none"> ▪ täiendav takistus kontaktliinis ▪ pingelangu suurenemine kontaktliinis ▪ võimsuskao suurenemine ▪ vahemikud kontaktliinis ▪ elektriikaare teke isolatsioonivahemikel ▪ elektromagnethäiringute vähendamine ei ole teatud juhtudel piisav 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ süsteemi keerukus ▪ keeruline releekaitse

Elektrivõrku saab tugevdada seadmete ühenduspunktide teineteisele lähemale paigaldamisega või vähendades nende vahelist näivtakistust. Sellest tulenevalt on kontaktliinides eelistatum autotrafodega toitesüsteemi rakendamine [30]. Kontaktliinis tekkiva pingelangu ja sektsioonide isolatsioonivahemike tõttu on lisapingetrafodega toitesüsteemi võimalik rakendada ainult väikese koormusega raudteedel. Küll aga vähendab lisapingetrafode rakendamine kontaktvõrgus tagastuva voolu väärtust relssidel ja maapinnas tunduvalt enam kui ainult tagasivoolujuhiga süsteemis. See asjaolu on määrav piirkondades, kus on suur pinnase eritakistus, mistõttu leiavad lisapingetrafodega toitesüsteemid kasutust teatud spetsiifiliste tingimuste korral, näiteks Rootsis ja Norras [20].

Lekkevoolu ja indutseeritud pinge vähendamisele omavad mõlemad eelnevalt vaadeldud 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.

Sobiva kontaktvõrgusüsteemi valimine on tehnilis-majanduslik küsimus, mille puhul tuleks lähtuda võimsuseedastuse efektiivsusest ehk maksimaalse võimaliku väljundvõimsuse rakendamisest, pinge kvaliteedist ja häiringute summutamisest [26].

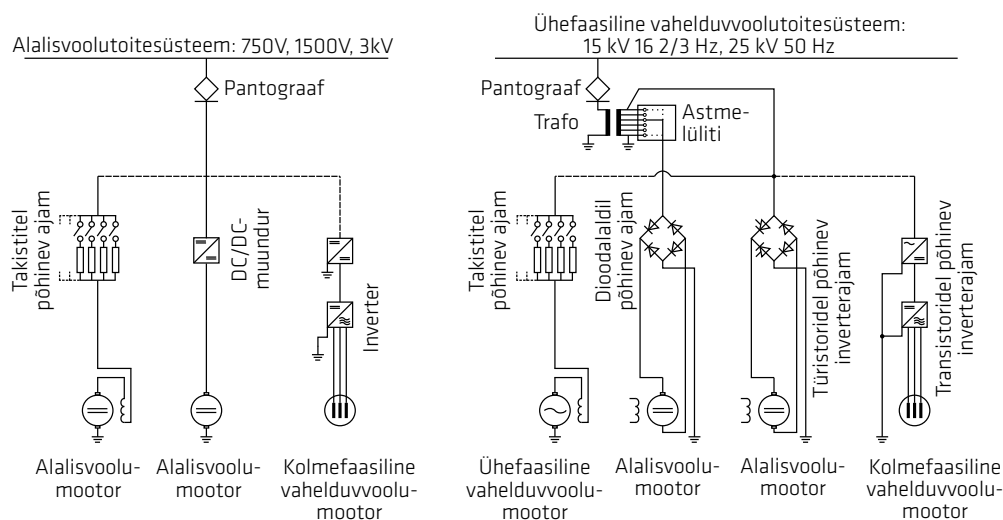
3 Elektriraudtee vedurid

3.1.	Takistitel põhinev ajam.....	23
3.2.	Dioodalaldil põhinev ajam.....	23
3.3.	Türistoridel põhinev inverterajam.....	23
3.4.	Transistoridel põhinev inverterajam.....	23

Üldistatult jagunevad raudteesüsteemides kasutatavad vedurid kolmeks: reisirongi-, kaubarongi- ja universaalvedurid. Lisaks vedurite sihtotstarbele jaotatakse need omakorda alaliikideks maksimaalse kiiruse ning veojõu järgi. Kaubarongide maksimaalkiirus jääb tavaliselt vahemikku 100–120 km/h [31; 32] ja standardseks veokoormuseks on 6000 tonni [31]. Tüüpilise reisirongi maksimaalne kiirus on vahemikus 180–200 km/h [33] ning veokoormuseks keskmiselt kuni 500 tonni [34]. Reisirongi üheks alaliigiks on veel kiirrong, mis saavutab kiirust rohkem kui 200 km/h [35]. Universaalvedureid kasutatakse nii kaubaku kui ka reisirongide vedamisel, kuna nende maksimaalne kiirus täidab reisirongide kiirusevajaduse ja nende veojõud on piisav, vedamiseks väiksema koormusega kaubarongi. Universaalvedureid kasutatakse tavaliselt seal, kus peatustevahelised vahemaad ei ole pikad ning kui puudub vajadus suure veojõu järele.

Elektriraudteedel kasutatavate vedurite klassifitseerimisel on oluliseks karakteristikuks ka ajamis kasutatav tehnoloogia. Kasutusel on nii alalisvoolu- kui ka vahelduvvooluajameid, mille konkreetne valik sõltub tootja- ja tellijavahelisest kokkuleppes. Valdavalt eelistatakse alalisvooluajameid, kuna need on paremini juhitavad ning sobivad seega elektriraudteedel kasutamiseks. Vahelduvvoolutoitega kontaktvõrgusüsteemide korral rakendatakse vedurites alaldi ja alalisvooluajami kombinatsiooni. Joonisel 3.1 on kontaktvõrgu- ja vedurisüsteemide põhimõtteskeemid.

Joonis 3.1.
Erinevate kontaktvõrgu-
süsteemide ja vedurite
põhimõtteskeemid [34]



Käesolevas peatükis on järgnevalt selgitatud vahelduvvoolukontaktvõrgusüsteemides kasutusel olevaid veduri ajami tüüpe.

3.1. TAKISTITEL PÕHINEV AJAM

Kõige esimene elektriraudtee veduri ajam oli takistitel põhinev ajam. Veduri mootori juhtimiseks kasutati mitmeid jadaühenduses olevaid takisteid. Takistuse väärtuse muutmisega saavutati muutus ühefaasilise kommutaatormootori kiiruses. Kõnealuse ajami tüüp oli laialdaselt kasutusel vahelduvvooluelektriraudtee algusaegadel, kuna see oli ehituselt lihtne ja töökindel. Takistusel põhineva ajami reguleerimise põhimõte oli aga äärmiselt ebaefektiivne, olles ebaühtlane ja põhjustades suuri energiakadusid. Tänapäeval seda tüüpi ajamid enam rakendust ei leia, kuna on nii moraalselt kui ka tehniliselt iganenud [34].

3.2. DIODALALDIL PÕHINEV AJAM

Ajamite teine põlvkond põhines dioodalalditel, mis võimaldasid toita vedurit vahelduvvoolukontaktvõrgust ning rakendada veduritel alalisvoolusüsteemi. Viimane muutis veduri ehituse oluliselt lihtsamaks. Juhtimine toimus toitetrafo pingeaastme muutmisega, kuna dioodalaldiga polnud alalispinge reguleerimine võimalik. Takistitel põhinevad ajamid asendati dioodalalditega, mis ühendati kontaktvõrgu süsteemipingele läbi reguleeritava trafo [34]. Diodalaldi tagas rongi parameetrite oluliselt ökonoomsena reguleerimise, võrreldes takistustel põhineva ajamiga. Tänu lihtsale ehitusele leiab dioodalaldil põhinevaid ajameid kasutusel ka tänapäeval [34].

3.3. TÜRISTORIDEL PÕHINEV INVERTERAJAM

Elektriraudtee vedurite ajamite kolmas põlvkond põhineb türistoridega inverteritel. Inverterite kasutamine võimaldab veosüsteemis rakendada kolmeefaasilisi asünkroonmootoreid. Inverteri ning asünkroonmootori kombinatsioon tagab veduri veosüsteemi täpsema reguleerimise. Lisaks osutus võimalikuks ka digitaalsete abifunktsioonide kasutamine, näiteks veojõukontrolli rakendamine [34]. Diodid asendati nüüd türistoridega ja sellega likvideeriti pinge reguleerimise probleemid. Enam ei pidanud reguleerimiseks mehaaniliselt trafo pingeaastet muutma, tänu millele hoiti kokku trafo hoolduskuludelt.

Tänapäeval kasutatakse elektriraudtee vedurite inverterites enamasti paisu kaudu suletavat tüüpi türistore (GTO – *Gate Turn Off*), kus vooluimpulsiga on võimalik türistor sulgeda soovitud ajahetkel. Türistoridel põhineva inverteri kasutamine võimaldab mootori pöördemomendi sujuvat reguleerimist, mis omakorda muudab veduri efektiivsemaks, võimaldades veojõu maksimaalset rakendamist. Türistoridel põhinevate inverterite skeemid koostatakse regeneratiivset pidurdamist silmas pidades. Sellise lahenduse peamiseks puuduseks on madal võimsustegur ja tarbitava voolu tugev moonutus [34].

3.4. TRANSISTORIDEL PÕHINEV INVERTERAJAM

Kõige uuema põlvkonna elektriraudtee veosüsteemidest moodustavad transistoridel põhinevad inverterid. Oma olemuselt on tegemist türistoridel põhinevate inverterite veosüsteemi edasiarendusega, kus türistoride asemel kasutatakse valdavalt isoleeritud paisuga bipolaartransistore (IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*). IGBT-transistoridel on GTO-türistoridega võrreldes olulisi eeliseid. Esiteks suudab IGBT-transistor välja lülitada kõrge efektiivväärtusega voolusid (enam kui 1 kA). Tänu niisugusele omadusele on vähima transistoride arvu juures võimalik luua samaväärne inverter, mistõttu on see tunduvalt kompaktsem ja vajab vähem jahutamist. Lisaks on IGBT-transistoril GTO-türistoridega võrreldes võimalik 3–4 korda kiiremini lülitada. Seega on võimalik vähendada moonutusi voolu lainekujus ning veduri tekitatavaid harmoonikuid [36].

4 Elektriraudtee mõju elektrisüsteemi talitlusele ja elektri kvaliteedile

4.1.	Püsitalitlusprobleemid.....	25
4.2.	Pingeasümmeetria.....	25
4.3.	Toitepinge harmoonikud.....	28
4.4.	Regeneratiivne pidurdamine.....	30
4.5.	Elektromagnetiline ühilduvus.....	31
4.6.	Ebaühtlane kontakt pantograafi ja kontaktliini vahel.....	31
4.7.	Toitepiirkondadeülene liikumine.....	33

Elektriraudtee ühendamise elektrisüsteemi esitab süsteemioperaatorile väljakutseid ning eeldab uusi teadmisi nii ülekande- kui ka jaotusvõrgu valdkonnas. Elektriraudtee koormus erineb suuresti klassikalisest elektritarbijast, mis on reeglina kohakindel ning millega kaasnevad mõjud on seotud konkreetse piirkonna liitumispunktiga. Elektriraudtee koormus on asukoha ja tarbimismahu poolest pidevas liikumises. Just tarbimispunktide pidevast muutumisest tuleneb elektrisüsteemi seisukohalt elektriraudtee peamine kitsaskoht, mis põhjustab operaatoritele raskusi elektrisüsteemi vahetel jälgimisel. Sellest tulenevalt on vajadus uute monitooringusüsteemide järele, mis võimaldaksid probleeme täpsemalt hallata ning vältida probleemsete sõlmpunktide tekkimist.

Elektriraudtee toitesüsteem ja ülekandevõrk mõjutavad teineteist vastastikku – probleemid ühes süsteemis kanduvad üle ka teise. Elektritranspordisüsteemid nõuavad kõrgendatud töökindlust ning elektrisüsteemi operaatoritelt suurt vastutust, seda eriti juhtudel, kui elektritranspordi kasutamine on kõrgendatud tähtsusega või omab märkimisväärset osakaalu kogu transpordimahust. Tarbimise pidevast muutumisest tulenevalt on oluline tagada kvaliteetne elektrienergia igas võrgu punktis. Viimane nõuab elektrisüsteemi täiendavat renoveerimist, investeeringuid süsteemi läbilaskevõimesse ja töökindluse tõstmisesse. Sidestatud süsteemi puhul mõjutab iga suuremamahtuline häiring omakorda suurt hulka tarbijaid, mis paneb kaalule tarbijate usalduse ja rahulolu ning on seega majanduslikult seisukohast elektriraudtee projekti oluliseks eelduseks.

Alalisvoolu elektriraudteesüsteemid saavad toite reeglina jaotusvõrgust, kuna nende ühikvõimsus on väiksem ning kontaktvõrgu toitepunktid on paigutatud tihedamalt. Seetõttu puudub otsene mõju ülekandevõrkudele [37; 38]. 3 kV alalisvoolusüsteemide toitmine ülekandevõrgu sõlmajamades leiab aset ainult erilahenduste korral ning seda süsteemi lõikudes, kus on kasutusel suure ühikvõimsusega vedurid [38].

Alalisvoolu elektertranspordi mõju elektrisüsteemi talitlusele piirneb peamiselt püsitalitlusprobleemidega ning elektrivarustuskindluse tagamisega elektriraudteesüsteemile [37; 38]. Alalisvoolul põhinev elektriraudtee on elektrisüsteemile kolmefaasiline sümmeetriline tarbija, mistõttu ei kaasne sellega normaalitalitluses pingeaasümmeetria probleeme. Pingeaasümmeetriat võib sellises süsteemis esineda rikkeolukorras, kui toitepunkti alalditest üks või enam on välja lülitatud. Tulenevalt sümmeetrilisest elektrienergia tarbimisest ja normaalitalitluses pingeaasümmeetria puudumisest, on alalisvoolu elektriraudteesüsteeme võimalik ühendada ka elektriliselt võrdlemisi nõrkadesse võrkudesse [38].

Erinevalt alalisvoolul põhinevatest toitesüsteemidest, kaasnevad vahelduvvoolu 25 kV 50 Hz elektriraudteesüsteemide ühendamise märgatavad mõjud ülekandevõrgule, mis sõltuvad nii elektrivõrgu konfiguratsioonist kui ka elektrisüsteemi tugevusest. Vähendamaks elektriraudtee talitlusest tekkivaid

negatiivseid mõjusid ning tagamaks elektriraudteesüsteemile piisavat elektrivarustust [37], ühendatakse vahelduvvoolul põhinev 25 kV 50 Hz elektriraudteesüsteem optimaalse liitumispunkti läheduses ülekandevõrgu kõige kõrgemale pingeastmele.

4.1. PÜSITALITLUSPROBLEEMID

Elektriraudteesüsteem on tavapärastel ühendatud ülekandesüsteemi kahe liinijuhi vahele (faas-faas ühendus), vähendades seeläbi elektrisüsteemi koormusvoole. Koormusvoolud jagunevad kahe liinijuhi vahel ning tänu kõrgemale liinipingele vähenevad elektrienergiakaod ja pingelang süsteemis. Liinijuhtidevahelise ühenduse täiendavaks eeliseks faas-maa ühenduse ees on esimese võimalus koordineerida asümmeetrilisest tarimisest tingitud vastujärgnevuskomponenti ning sundida seda sumbuma liinijuhtides. Neist põhjustest tulenevalt on otstarbekas elektriraudteesüsteemides rakendada just liinijuhtidevahelist ühendust [38; 39].

Elektriraudtee ühendusviisist tulenev koormuste ebaühtlane jagunemine tekitab elektrisüsteemis püsitalitlusprobleeme. Elektrirongi puhul on tegemist ühefaasilise, muutuva ja pidevas liikumises oleva tarbijaga. Kolmefaasilisest süsteemist on elektriraudtee koormusega koormatud vaid kaks faasi ning kolmanda faasi samaväärse koormuse puudumisel väheneb elektrivõrgu ülekandevõime teistele ülekandevõrgu kolmefaasilistele tarbijatele. Kaitsmaks ülekandevõrgu seadmeid ülekoormuse eest, on tarvis piirata võrgus esinevaid koormusvoole elektriraudtee kõige enam koormatud faasi järgi. Seega tuleb ülekandevõrgu operaatoril välja töötada releekaitse põhimõtted, mis arvestavad tarbija eripära.

Lisaks elektrivõrgu talitlusprobleemidele kaasnevad elektriraudteesüsteemiga täiendavad käiduprobleemid. Elektriraudtee kontaktvõrgud on oluliselt rikkealtimad kui tavapärased ülekandevõrgud, kuna tegemist on pikkade õhuliinilõikudega. Võimalikud häiringud elektriraudteesüsteemis võivad suurendada elektrivõrgu seadmete hooldusvajadust või isegi põhjustada nende sagedasemat hävinemist [3]. Kontaktvõrkudes on probleemiks lühised maaga. Tulenevalt kontaktvõrgu toitepunktide pikkadest vahemaadest ning sektsioneerivatest lõikudest, on rikke asukoha täpne leidmine keeruline ning nõuab tihti mitut taaslülitustsüklit. Nii taaslülitustsüklid kui ka võrdlemisi pikk lühiste kestvus mõjutavad pingekvaliteedinäitajaid elektriraudtee liitumispunktides. Lühised toovad endaga aga kaasa pingelohkused ning taaslülituste kommutatsioonid põhjustavad elektrivõrgus transientliigpingeid. Häiringut põhjustava allika leidmine ja sellele vastava kontaktvõrgu sektsiooni väljalülitamine võib kesta kuni minuti [3], mille jooksul jõuab releekaitse teha mitu taaslülitust.

Mainitu avaldab negatiivset mõju teistele, elektriraudteesüsteemiga samast elektrivõrgust toidet saavatele tarbijatele. Eespool nimetatud probleemid võivad tarbijatele põhjustada otsest majanduslikku kahju. Automatiseeritud tootmisliinide protsessid võivad pingelohkude korral peatuda. Nende taaskäivitamisega kaasnevad seadistamise kulud ja kahju saamata jäänud toodangust. Transientliigpinged on aga ohuks elektriseadmete isolatsioonile, mis võib puruneda, tehes kahju seadmetele ja pannes ohtu inimestele.

Klassikalises elektrisüsteemis arvestatakse oluliselt kiirema lühiste väljalülitamisega, millest lähtuvalt on dimensioneeritud elektrisüsteemi termiline vastupidavus. Pikema kestvusega lühised eeldavad elektrivõrgult suuremat lühisetaluvust ja valmisolekut.

4.2. PINGEASÜMMEETRIA

Elektrisüsteemi tavatarbijate puhul on peamisteks asümmeetria põhjustajateks lühiajalised asümmeetrilised lühised ning üksikud transponeerimata ülekandeliinid, mis aga ei põhjusta märkimisväärset asümmeetriat, ning seega võib väita, et ülekandevõrgus märkimisväärset pingeasümmeetriat tavatarbijate juures ei esine. Küll aga on süsteemi asümmeetria probleemiks ühefaasiliste tarbijate korral. Pingeasümmeetria mõjutab nii süsteemis töötavaid generaatoreid kui ka teisi tarbijaid. Pingeasümmeetria on üldises tähenduses mitmefaasilise elektrisüsteemi talitlusrežiim, mille puhul faasi- või ka liinipingete väärtused, samuti faasipingete nihkenurgad ei ole võrdsed ega sümmeetrilised. Pingeasümmeetria kuulub elektri kvaliteedinäitajate alla, mida väljendatakse pingevastu- ja pärijärgnevuskomponendi suhtena k_p (avaldis 4.1 [40]).

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

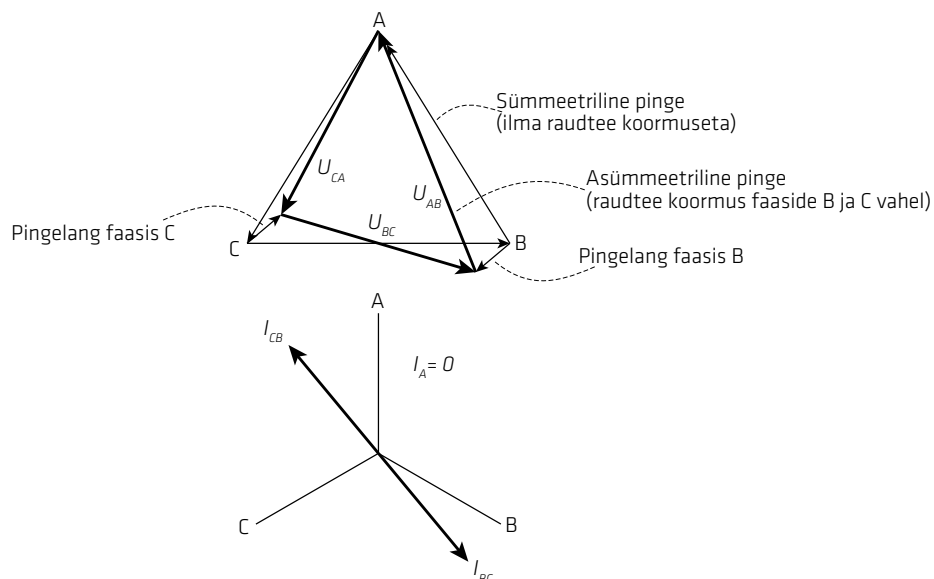
Vastujärgnevuskomponenti (U_2) genereerivad võrku vedurid ja see häirib tarbijate, eelkõige mootorite talitlust. Lisaks suurendab vastujärgnevusvool võimsuskadusid ja põhjustab valehäireid releekaitses.

Euroopa standardiga EN50160 [41] on normaaltalitlusel kehtestatud asümmeetria piirväärtus, mille kohaselt ei tohi vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutiline keskvärtus madal- ja keskpingel ületada 2% (mõningate mööndustega sõltuvalt võrgu ehitusest kuni 3%) ning kõrgepingel 1% pärijärgnevuskomponendist igapäevastel mõõtmistel 95% juhtudest. Riigiti on pingesümmeetria määrale kehtestatud aga eelnevast erinevad normid. Näiteks Suurbritannias on erinevalt standardist EN50160 kõrgepingel lubatud asümmeetria väärtuseks kuni 2%. Prantsusmaal on kiirraudteeliinide korral kehtestatud eraldi normid, mille kohaselt on lubatavaks asümmeetria väärtuseks lühiajaliselt (vähem kui 15 min) kuni 1,5% ning pikemaajaliselt 1% [42]. Pingesümmeetria väärtused Eesti kõrgepingevõrkudes on defineeritud Eleringi dokumendis VJ18 [43], kus pingesümmeetriategur on 110 kV mõõtepunkti piiratud 2% 10-minutilise mõõteperioodi keskvärtusest igapäevastel mõõtmistel 95% juhtudest. Individuaalsele alajaama toitele liituvale koormusele on nimetatud piirangud kitsendatud ja maksimaalseks lubatavaks asümmeetriateguriks on ühele lisanduvale koormusele seatud 1% sama ajaperioodi juures. Need piirangud vastavad näiteks Soome elektrienergia kvaliteedinäitajatele [40] ja Euroopa Standardile [41].

Eespool kirjeldatust selgub, et asümmeetrilisest koormusest tingitud pinge väärtuste erinevus toob elektrivõrgus kaasa püsitalitlusprobleeme, vähendades võrgu ülekandevõimet ja avaldades negatiivset mõju tundlikele tarbijatele. Tekkiv pingesümmeetria põhjustab võrgus vastujärgnevusvoolu levikut. Viimane kujutab ohtu nii seadmetele kui ka elektrivõrgu efektiivsele ja ohutule talitlusele. Vastujärgnevusvool suurendab elektriseadmete ja -liinide kadusid, vähendab trafode ja generaatorite efektiivsust ning põhjustab valeülitustoiminguid releekaitses [44]. Lisaks juba mainitule võib vastujärgnevusvool põhjustada ka mootorite ja generaatorite ülekuumenemist, vibratsiooni ja müra, mille tulemusena väheneb märgatavalt seadmete eluiga [40; 42].

Vahelduvvoolul põhineva 25 kV 50 Hz elektriraudteesüsteemi rakendamine loob elektrivõrgus uue püsitalitlusrežiimi, kus liinidevahelise ühenduse tõttu muutuvad oluliselt faasipingete ning liinipingete väärtused, aga ka faasinihkenurgad. Joonisel 4.1 on esitatud pinge ja voolu vektordiagrammid sümmeetrilisel (peenjoon) ja asümmeetrilisel (jämeejoon) talitlusel. Koormusvoolude vektordiagrammil on kujutatud faaside B ja C vahele ühendatud elektriraudtee tekitatud voolukomponendid I_{BC} ja I_{CB} , mille nihkenurgad erinevad oluliselt sümmeetriliste koormusvoolude A, B ja C omadest.

Joonis 4.1.
Pinge ja voolu vektordiagrammid sümmeetrilise (peenjoon) ning elektriraudtee poolt põhjustatud asümmeetrilise (jämeejoon) koormuse korral



Vektordiagrammide võrdlusest selgub, et pingevektor U_{BC} orienteerub koormusvoolude järgi, kuna viimased põhjustavad pingelangud faasides B ja C. Faasipingete muutumise tõttu vähenevad liinipingete U_{BC} ja U_{CA} amplituudväärtused ning nihkenurgad, kuid samas jääb muutumatuks liinipinge U_{AB} . Võrreldes sümmeetrilise talitlusega, tekib elektriraudtee koormuse lisandumisel oluline pingeparameetrite moonutus [38].

Pingeasümmeeria taseme analüüsi ja teguri k_a teoreetilist määramist ülekandevõrgu ja elektriraudteesüsteemi ühendavas alajaamas käsitletakse detailsemalt allikas [45].

Ülekandevõrgus elektriraudteesüsteemi tõttu tekkiv pingeasümmeeria sõltub peamiselt kolmest asjaolust, milleks on ülekandevõrgu elektriline tugevus, raudteeliini summaarne koormus ja raudteesüsteemi võrgu ühendamise meetod [45].

Tekkivat pingeasümmeeria olukorda on tulenevalt erinevate kompenseerimist vajavate parameetrite tõttu klassikaliste meetoditega keeruline lahendada. Pingeasümmeeria mõjude vähendamiseks liidetakse elektriraudteesüsteem elektriliselt võimalikult tugevasse elektrivõrku, vähendades seega häiringute osakaalu, kuna tekkiv asümmeeria väärtus on otseses sõltuvuses võrgu lühisvõimsusest. Elektriliselt nõrgas elektrisüsteemis on tekkiv pingeasümmeeria suurem, põhjustades probleeme piirkonna elektritarbijatele. Samas elektriliselt tugevama süsteemi korral on kaasneva pingeasümmeeria osakaal oluliselt väiksem, mõjutamata sealjuures teisi tarbijaid [40].

Lisaks elektriraudtee koormuse suurusest (ülekandevõrgu faaside koormatavuse erinevusest) ja elektrisüsteemi elektrilise tugevuse tasemest on elektriraudtee koormusest tingitud pingeasümmeeria levik ja selle edasikandumine võrgus sõltuv ka raudteesüsteemis rakendatavast trafotüübist, kuna viimasest sõltub tekkiva vastujärgnevuskomponendi suurus [44].

Pingeasümmeeria taseme ja selle võrgus edasikandumise määramine nõuab põhjalikku elektrisüsteemi dünaamika analüüsimist. Teisest küljest annab pingeasümmeeria uuring elektrivõrgus olulist informatsiooni ka teiste häiringute leviku ulatuse kohta ning aitab määratleda elektriraudtee koormuse võimalikke mõjusid teistele elektrisüsteemi tarbijatele. Minimeerimaks pingeasümmeeria häiringuid, ühendatakse elektriraudtee toitesüsteem ülekandevõrgus kõrgeimale võimalikule pingestmele ning lisaks võidakse ühendustrafodena rakendada eri tüüpi trafoühendusi [45].

Asümmeeria mõju generaatorile

Elektriraudtee koormuse liitumisel 110 kV ülekandevõrku tekib viimases märgatav (1–4%) pingeasümmeeria, mille tase varieerub vastavalt liitumispunkti elektrilisele tugevusele [46]. Selline pingeasümmeeria on oma olemuselt püsiv. Generaatorid on pöörlevad seadmed, mis ei ole projekteeritud püsivaks (enam kui 120 sekundit) talitluseks pingeasümmeeria piirmäärade lähedastes tingimustes [47]. Mõistmaks pingeasümmeeria mõju generaatorile, on tarvis teada nii pinget kui ka voolu vastujärgnevuskomponentide mõju generaatoris. Üldise ülevaate sellest temaatikast annab [47], kus selgitatakse detailselt vastujärgnevuskomponentide mõju ja käitumist generaatoris.

Ülekandevõrgus on pingeasümmeeria ning sellest tingitud mõjude analüüs olulisel kohal, kuna toitepingest sõltub nii ülekandeliinide kui ka tarbijate käitumine. Pöörlevate masinate, sünkroon- ja asünkroongeneraatorite/mootorite puhul on seejuures oluline vaadelda pingeasümmeetriaga tugevas seoses oleva koormusvoolu vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtust, mis omab masinasiseses protsessides suuremat mõju kui toitepinge asümmeeria [47]. Generaatorisse siseneva voolu vastujärgnevuskomponent (I_2) indutseerib pärijärgnevusmagnetvoo komponendile vastupidises suunas pöörleva magnetvoo, mis pidurdab generaatori rootorit [47]. Sellest tulenevalt põhjustavad pinget- ja vooluasümmeeria generaatoris järgnevaid mõjusid:

- generaatori rootori ülekuumenemine;
- generaatori võimsuskadude (sh elektrijaama kütusekulu) suurenemine;
- turbiini ja generaatori võlli vibratsioon;
- turbiini ja generaatori võlli mehaanilisest võnkumisest tingitud väändumine.

Valdavalt kasutatakse pingeasümmeeria mõjude kirjeldamiseks generaatorisse sisenevat voolu vastujärgnevuskomponenti, kuna see on kergelt mõõdetav ning universaalne kõigi generaatorite ja mootorite korral [48; 49]. Tulenevalt asjaolust, et voolu vastujärgnevuskomponendi indutseeritud magnetvoo töötab vastu pärijärgnevusmagnetvoole, tekib rootori mähises normaalsest suurem vool, mis põhjustab omakorda rootori kuumenemist. Tulenevalt generaatori ehitusest on rootor aga kõige raskemini jahutatav osa generaatoris, mistõttu võib rootori ülekuumenemine endaga kaasa tuua kiiresti edasi arenevaid kahjustusi. Vastavalt IEEE standarditele [48; 49] määratletakse voolu vastujärgnevuskomponendile piirmäärad nii püsi- kui ka lühitalitlusel. Vastavad suurused on esitatud tabelites 4.1 ja 4.2.

Tabel 4.1.
Koormusvoolu vastujärgnevuskomponendi piirmäärad püsitalitlusel [49]

Generaatori tüüp	I_2 (%)
Otsejahutusega rootor	10
Kaudse jahutusega rootor	-
...350 MVA	8
351-1250 MVA	$8 - (S_n - 350) / 300$
1251-1600 MVA	5

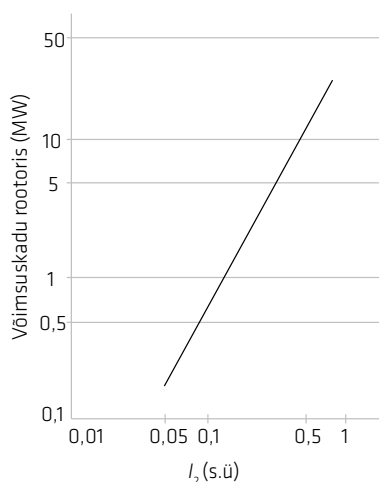
Tabelis 4.1 esitatud piirmäärad näitavad lubatud voolu vastujärgnevuskomponendi I_2 osakaalu generaatori nimivoolust. Kehtestatud piirmääradest selgub, et mida võimsam on generaator, seda tundlikum on ta asümmeetrilisele talitlusele [50]. Lühisetalitluse korral kasutatakse vastujärgnevuskomponendi piirmäära kirjeldamisel tegurit $I_2^2 t$, mis kirjeldab voolukomponendi I_2 poolt põhjustatud soojusena salvestuva energia hulka generaatori rootoris lühise kestvuse t jooksul.

Tabel 4.2.
Koormusvoolu vastujärgnevuskomponendi piirmäärad lühisetalitlusel [49]

Generaatori tüüp	$I_2^2 t$ (%)
Otsejahutusega rootor	30
Kaudse jahutusega rootor ...800 MVA	10
800-1600 MVA	$10 - (0,00625) \cdot (S_n - 800)$
1600... MVA	kokkuleppeline

Lisaks rootori kuumenemisele suurenevad generaatoris voolu vastujärgnevuskomponendi tõttu ka võimsuskadod. Viimased jagunevad kaheks, esiteks põhimagnetvoole vastu töötav magnetvoog, mis avaldub täiendava hõõrdejõuna ning takistab generaatori pöörlemist, ning teiseks rootoris indutseeritud voolud, mis põhjustavad termilist kadu [51]. Joonisel 4.2 on toodud voolu vastujärgnevuskomponendi tõttu tekkiv võimsuskadu generaatori rootoris. Jooniselt kajastub, et rootoris tekkivad kadod on lineaarses suhtes voolu vastujärgnevuskomponendiga [51]. Generaatori kadude tõttu suureneb paratamatult elektrijaama ploki kütusekulu vastavalt kadude suhtele generaatori väljundvõimsusesse, mistõttu ei järgi asümmeetrilise talitluse korral generaator enam PQ nimikarakteristikut.

Joonis 4.2.
Voolu vastujärgnevuskomponendi ja rootoris tekkiva võimsuskao suhe [51]



4.3. TOITEPINGE HARMOONIKUD

Elektriraudtee koormuse liitumine elektrivõrku toob elektri kvaliteedinäitajate seisukohalt kaasa täiendava tähelepanuvajaduse pinge- ja voolukõverate siinuselise lainekuju moonutustele ehk harmoonikutele. Vahelduvvoolu elektriraudteesüsteemis on voolu ja pingelaine kujude moonutuste peamiseks põhjustajaks rong ja selle seadmed [52], näiteks pantograafi libisev kontakt, pulsilaiusmodulatsiooni (*PWM - pulse-width modulation*) kasutav ajam, katkematu toiteallikas (*UPS - uninterruptible power supply*), rongi mehaaniline süsteem ja jõuelektronika muundurid [53]. Seega sõltub harmoonikute tase peamiselt veduri tehnilisest lahendusest ja selle ajamites kasutusel olevatest pooljuhtmuunduritest.

Veojõu edastamisega levivad elektrirongide tekitatud harmoonikud kontaktliinide vahendusel elektrisüsteemi [52]. Sellest tulenevalt avaldab harmoonikute levikule mõju ka elektriraudteesüsteemi kontaktvõrgu tehniline lahendus. Kontaktliinide näol on tegemist RLC vooluringiga (sisaldavad nii aktiiv-,

induktiiv- kui ka mahtvuslikku komponenti), mis võib kaasa tuua resonantsnähtuse tekke. Harmooniku ja resonantssageduse kokkulangemisel võimenduvad lainekuju moonutused veelgi.

Harmoonikud põhjustavad isoleermaterjalide kiiremat vananemist ning mõjutavad elektrivõrgust toideta- vaid elektriseadmeid, tuues pikemas perspektiivis kaasa märkimisväärseid majanduslikke kahjusid. Har- moonikutega kaasnevad mitmed probleemid, näiteks elektromagnetilised häiringud lähedal paiknevates sideliinides ja signaalsüsteemides, valeoperatsioonid kaitseseadmetes, vibratsioon jõukondensaatorites, soojuskaod trafodes ja õhuliinides, ülekuumenemine ning võimalikud liigpinged ja -voolud [52–54].

Tulenevalt harmoonikute negatiivsest mõjust tarbijate elektripaigaldistele, on ülekandevõrgu operaatori kohustuseks minimeerida võimalike häiringute edastamine teistele tarbijatele. Seetõttu on ülekande- võrgu operaatori seiskohalt oluline analüüsida ja hinnata elektriraudteesüsteemis kasutatavate vedurite põhjustatud harmoonikute taseme määra ning kehtestada vastavad piirangud ja meetmed, vältimaks võimalike kahjude tekkimist ülekandevõrgu teistele tarbijatele.

Harmoonikute taseme määramiseks on kasutusele võetud harmoonimoonutustegur (*THD* – *total harmo- nic distortion*), mis leitakse järgneva avaldisega (4.2) [55; 56].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

h – harmooniku järk;

U_1 – põhikomponendi lainekuju;

U_h – h -nda harmooniku lainekuju.

THD väärtus ei tohi vahelduvvooluvõrgus madal- ja keskpingel reeglina ületada 8%. Ülekandevõrkudes lähtutakse plaanimisväärtustest, mille kohaselt ei tohi *THD* väärtus ületada 3%. *THD* väärtusest lähtu- valt jaotatakse elektrienergia kvaliteet jaotusvõrkudes järgnevateks tasemeteks [57]:

- kõrgtase – *THD* ≤ 3%;
- normaaltase – *THD* ≤ 6%;
- standardtase – *THD* ≤ 8%.

Võrguoperaatorid on elektrisüsteemist, tarbija iseärasustest ja ajalisest sõltuvusest lähtuvalt riigiti kehtestanud täpsemini määratletud lubatavad *THD* väärtused.

Elektriraudtee koormuse tekitatav harmoonikute hulk ja selle levik elektrivõrgus sõltub mitmest asja- olust. Harmoonikute hulk süsteemis suureneb veduri kiirendamisel ja pidurdamisel [52], mis on tingitud ajamite talitlusest vastavale režiimile üleminekul. Lisaks toimub siinuselise voolukuju moonutus seoses rongi asukohaga süsteemis. Selgub, et mida kaugemale rong vealajaamast liigub, seda suurem on har- moonikute amplituudväärtus [52]. Loomulikult on mitmerööpmeliste raudteeliinide korral harmoonikute hulk märgatavalt suurem, seda esiteks harmoonikuid põhjustavate allikate (vedurid ja nende seadmed) enama osakaalu tõttu süsteemis. Teiseks, kontaktvõrgus mitmete juhtide põhjustatud vastastikuste induktiiv- ja mahtvusjuhtivuste sidestuse tõttu, mis suurendavad resonantsnähtuse esinemise tõenäo- sust ja seega võimalikku harmoonikute võimendumist süsteemis [52].

Harmoonikute hulga piiramiseks elektrivõrgus tuleb kasutusele võtta täiendavad filtrid, mis eliminee- rivad teatud järgu harmoonikuid. Viimased lisatakse harmoonikute allikale võimalikult lähedale, seega rakendatakse juba vedurites teatud hulgal harmoonikute osakaalu vähendavaid filtreid.

Nagu eespool mainitud, levivad elektriraudtee kontaktvõrgusüsteemist harmoonikud edasi ülekande- võrku, põhjustades häiringuid ülekandevõrgu teistele tarbijatele. Teatavat mõju kahe süsteemi vahelisele harmoonikute ülekandumisele omab vealajaama paigaldatud trafo tüüp. Harmoonikute piiramise mää- r sõltub sel juhul nende järgust, koormuse suuruselt ja jagunemisest [58]. *Scott*-tüüpi trafo ülekande- võrgu kolme faasi vahele ühendamise eripärast tulenevalt jagatakse vealajaamas ka genereeritud har- moonikud kõigi kolme faasi vahel, mistõttu on harmoonikute väärtus ühe faasi kohta väiksem. Viimane eeldab aga elektriraudtee sektsioonide sümmeetrilist koormust, mida paraku tuleb raudteeliinidel ette harva. Seega ei saa vealajaamas rakendatav trafoühendus olla otsustavaks teguriks harmoonikute leviku piiramisel elektrisüsteemis.

4.4. REGENERATIIVNE PIDURDAMINE

Jõuelektroonika areng on endaga vedurites kaasa toonud lisaks tavapärasele mehaanilisele pidurdamisele ka elektrilise pidurdamise ajamiga. Ajamiga pidurdamisel ehk regeneratiivsel pidurdamisel kasutatakse mootori pöörlemistakistust ratastega pidurdamiseks. Sellisel pidurdusrežiimil töötab veduri mootor generaatorina, kus pöördejõu allikaks on rongi inertsjõud.

Regeneratiivse pidurdamise peamiseks eeliseks tavapärase pidurdamise ees loetakse veoenergia säästu, mis võib olla isegi kuni 30% [34; 59–62]. Lisaks energiasäästule väheneb regeneratiivse pidurdamise rakendamisel pidurite mehaaniline kulumine, mis võimaldab kokkuhoidu hoolduskuludelt [63].

Vastavalt rongi tehnilisele lahendusele on võimalik regeneratiivset pidurdusenergiat tagastada süsteemi, kus seda saab rakendada otstarbekamatel eesmärkidel kui lihtsalt eralduva soojusenergiana. Enim levinud on pidurdusenergia rakendamine rongisiseseks tarbimiseks, kus pidurdusel vabanev energia leiab kasutust rongi abitoiteahelates. Võimalik on ka vabaneva energia edastamine raudteesüsteemi toitevõrku. Viimasel juhul on otstarbekaim ja efektiivseim regenereeritud energia rakendamine teiste, liini samas toitesektsioonis liikuvate vedurite toiteks. Niisugust lahendust kasutatakse laialdaselt trammiliinidel, kus liikumisgraafikud on tihedad ning peatustevaheline teekond lühike [64]. Soodsate asjaolude korral annab rahuldavaid tulemusi ka regeneratiivse pidurdusenergia rakendamine kõrgepingevõrgust toidetavatel kiirraudtee magistraalliinidel. Seda aga mitme rongi üheaegsel samas kontaktliini toitesektsioonis paiknemisel ja raudteeliinidel, mis kulgevad mägisel maastikul. Viimasel juhul on oluline, et rongide liikumisgraafikud oleksid kohandatud nõnda, et samal ajal liigub üks rong ülesmäge ja teine allamäge [64]. Seda ei ole paraku kõikjal kerge saavutada.

Juhul kui pidurdava rongi läheduses ei asu sel hetkel teisi ronge, on alternatiivseks lahenduseks ka energia talletamine. Selleks kasutatakse raudteeliini äärde paigaldatud kohakindlaid energiasalvesteid, kust vajaduse korral saab energiat hiljem ära kasutada rongide kiirendamiseks. Liiniäärsete salvestite rakendamine on maailmas hetkel veel arendusjärgus, kuid kogub üha enam populaarsust tänu oma väiksemale kaalule ja ruuminõudlikkusele, kui seda on tavapärased rongidele paigaldatavad salvestusseadmed. Teisest küljest tuleb aga meeles pidada, et teeäärsete energiasalvestitega suurenevad energia transportimisel tekkivad kaod [65]. Teeäärsete salvestitena leiavad kasutust näiteks hoorattad, akud ja ülikondensaatorid [65].

Lisaks eespool mainitule on kasutust leidnud ka regeneratiivse energia ülejäägi ülekandevõrku edastamine, seda vastavalt elektrivõrgu võimekusele ja tugevusele. Niisugune lahendus leiab eelkõige kasutust just 25 kV vahelduvvoolutoitesüsteemide korral [64]. Kuigi teatud tingimuste juures on selline lahendus võimalik, ei ole süsteemioperaatorid seda alati rakendama. Regeneratiivse pidurdamise korral on tegemist keeruka dünaamilise protsessiga, mille korral muutub lühikese perioodi vältel nii elektrienervajavoo suund kui ka pinge väärtus. See tekitab elektrivõrkudes pinge efektiivväärtuste järske muutusi ja keerukaid võnkeprotsesse ning mõjutab oluliselt elektrivõrgu stabiilsust, eriti mitme rongi samaaegsel pidurdamisel ühe toitealajaama piirkonnas [23; 63].

Regenereeriva pidurdussüsteemi rakendamise otstarbekuse analüüsimiseks tuleb vaadelda mitmeid asjaolusid. Nii pidurdamise kui ka kiirendamise režiimis esinevad kaod, seega pidurdamisel vabanev energiahulk on märgatavalt väiksem kui veduri kiirendamisele kulutatud energia [34]. Regeneratiivse pidurdussüsteemi rakendamine võib hinnanguliselt vähendada küll aktiivenergia vajadust, kuid kokkuvõttes ei avalda mõju rongi kogu energiatarbimisele [34].

Lisaks eelpool mainitule on regenereeriva pidurdussüsteemi kasulikkus energiasäästu saamiseks piiratud ka veduri kiirusega. Pidurdusenergia ja kiiruse vahelisest sõltuvusest [63] selgub, et kiiruse vähene-misel väheneb ka pidurdamisel saadava energia hulk. Seega on rongi väikese kiiruse korral regenereeritud pidurdusenergia limiteeritud.

Regeneratiivse pidurdusrežiimi juures on oluline märkida, et pidurdamisele kuluv teekond on tunduvalt pikem, võrreldes rongi mehaanilise pidurdamisega, mil rongi pidurdusteekonna lühendamiseks kasutatakse hõõrdejõudu. Seda asjaolu tuleb silmas pidada kiiret pidurdust nõudvates olukordades, näiteks hädapidurdamisel ning ühtlasi ka rongide graafikus püsimisel. Juhul kui rongi graafikus püsimine on oluline ning teekonnal esineb mitmeid peatusi, kus võib esineda viivitusi, eelistatakse regeneratiivse pidurdamise asemel mehaanilist pidurdust.

Pidurdusenergia elektrivõrku suunamisel tuleb silmas pidada kontaktvõrgus kaasnevat pingetõusu. Seega sõltub energia edastamise võimalikkus ning selle hulk ka kontaktvõrgust ja viimase vastuvõtlikkusest. Pinge väärtuse tõus üle lubatud piirmäära võib ohustada elektrivõrgus paiknevaid seadmeid, mistõttu osutub tarvilikuks alajaamadesse paigaldada pinget piiravad seadmed. Liialt kõrge pinge piiramiseks rakendatakse veduritel lisatakistusi, mis vähendavad genereeritavat võimsust [34; 59]. Rongi maksimaalkiiruse juures ei ole soovitatav täismahus regeneratiivne pidurdamine, kuna see võib põhjustada suuri pingekõikumisi kontaktvõrgus. Küll aga on täismahus regeneratiivne pidurdamine sobiv veduri püsikiirusel [34].

Regeneereeritud energia toitevõrku suunamisel tuleb tähelepanu pöörata mitmetele asjaoludele. Seoses elektrienergia kvaliteediga on täheldatud mitmeid kahjusid, näiteks talitlushäired veduri seadmetes, induktiivsusest tingitud häiringud sidekaablites, kõrgemate harmoonikute resonantsist põhjustatud võimsuskaod, nõrkade elektriseadmete kahjustused, aga ka kaitserleede talitlushäiringud ja pingekõikumised [61]. Üheks olulisemaks asjaoluks on võrku kanduvate harmoonikute hulk pideval tõuke- ja pidurdusjõu vaheldumisel. Kõrgemad harmoonikud mõjutavad sidesüsteeme ja raudteevõrgusisesid signaalsüsteeme [60].

Regeneratiivse pidurdamissüsteemi rakendamise kasulikkus sõltub nii pinge väärtuste variatsioonist rongil kui ka elektrisüsteemi tugevusest üleüldiselt. Regeneratiivse pidurdusprotsessi hindamiseks ja modelleerimiseks osutuvad vajalikuks keerukad mudelid, mis hõlmavad elektrilisi ja mehaanilisi komponente, võttes arvesse rongi mehaanilist iseloomu ja mehaanilis-elektrilisi muutusi rongi mootori lülitumisel generaator-režiimile [63].

4.5. ELEKTROMAGNETILINE ÜHILDUVUS

Üheks probleemiks elektriraudteeliinide juures on elektromagnetilised häiringud, mille peamiseks põhjustajaks on maaühendusvool. Sõltuvalt rakendatavast kontaktvõrgusüsteemist võib 40–100% [20] kogu tagastavast voolust kulgeda elektriraudteel mööda rööpaid ja maapinda. See põhjustab häiringuid nii lähedal paiknevates sideseadmetes kui kaablites [26]. Lisaks maaühendusvoolu mõjule esinevad kontaktliinidega paralleelselt paigaldatud sideliinides ka indutseeritud häiringud, mis tekivad veduri möödasõidul voolu väärtuse suure muutuse tõttu [24]. Kontaktliinid võivad olla vahendajaks häiringutele, mis pärinevad elektrirongi veo- ja abitoitemuundurist, ning ka häiringutele, mille põhjustajaks on kontaktliini toitvas alajaamas paiknevad alaldusseadmed.

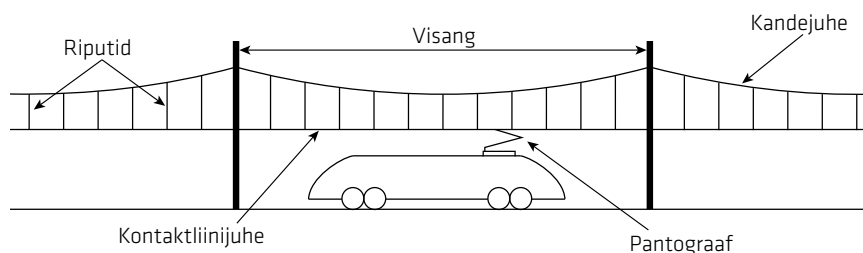
Standardi EN 50121 alusel käsitletakse elektromagnetilist ühilduvust olenevalt selle mõjust nii raudteel kasutatavatele signaal- ja kommunikatsiooniseadmetele kui ka väljaspool süsteemi paiknevatele seadmetele.

Elektromagnetiliste häiringute leevendamise peamiseks meetodiks on elektriraudteeliinidel efektiivsema kontaktvõrgusüsteemi rakendamine, kus tagastav maaühendusvool suunatakse mööda relsse ja maapinda kulgemise asemel tagasivoolujuhti.

4.6. EBAÜHTLANE KONTAKT PANTOGRAAFI JA KONTAKTLIINI VAHEL

Kontaktvõrgu näol on tegemist kompleksse õhuliinisüsteemiga, mis peab toite tagama pidevas liikumises olevale tarbijale (rongile), mistõttu esineb kontaktvõrgus ka konstruktsioonilisi probleeme. Energia vahendajaks õhuliini ja rongi vahel on viimasele paigaldatud pantograaf, liikuv mehaaniline seade (joonis 4.3).

Joonis 4.3.
Veduri pantograaf on energia vahendaja kontaktvõrgusüsteemi ja rongi vahel



Katkestusteta veoenergia tagamiseks on oluline püsiv ja kvaliteetne vastastikune toime kontaktliini ja pantograafi vahel, mille efektiivsust vähendavad rongi liikumine ja mehaaniline vibratsioon, liini ebaühtlus ja võimalikud konarused kontaktliinis [66]. Nõrk ühendus ja iga väikseimgi katkemine kontaktliini ja pantograafi vahel toovad endaga kaasa sädeluse ja elektrikaare tekkimise, kahjustades mõlemat kontaktpinda ja põhjustades detailide vananemist. Täiendavad kahjustused suurendavad omakorda aga veelgi enam elektrikaare tekkimise tõenäosust.

Lisaks mehaanilistele kahjustustele põhjustab pantograafi ja kontaktvõrgu vahelise ühenduse katkemine lühiajalise koormuskatkestuse ning kaarleegi tekkimisega kaasneb mittelineaarne koormusvool. Viimane toob endaga kaasa täiendavate harmoonikute tekkimise elektrivõrgus ja põhjustab olulisi pingekvaliteedi probleeme. Peamiselt tajutakse kaarleegist tingitud koormuse kõikumist ning kaarleegi ajal mittelineaarsest koormusvoolust tingitud pinge kõikumist väljusena (lampide vilkumisena).

Pantograafi ja kontaktliini halvast ühendusest põhjustatud sädelus toob lisaks eespool mainitule endaga kaasa veel elektromagnetilise ühilduvuse probleemid, kuna põhjustab häiringuid elektriraudtee läheduses asuvates sidevõrkudes (kus ei kasutata fiberoptilisi liine). Teatud tingimustel võivad sädelusest tingitud häiringud levida ka raadioside sagedusalasse [67].

Katkemiste tõenäosuse vähendamiseks ja hea kontakti saavutamiseks veduri pantograafi ja kontaktliinijuhi vahel on vaja tugevdada kahe süsteemi vahelisi kontaktjõude. Selleks kasutatakse elektriraudtee kontaktvõrgus kontaktjõudude tugevdamiseks lisaks kontaktliinijuhile ka kandejuhet. Viimase konstantse mehaanilise pinge ja kontaktjuhtme rippe vältimiseks lisatakse süsteemi mehaanilised automaatpingutid (joonis 4.4). Kaarleegi vältimiseks kasutatakse tänapäeval ka pantograafide aktiivjuhtimist elektrimootoritega, tagamaks pantograafi pideva ja konstantse surve vastu kontaktliini [3; 66].

Joonis 4.4.
Kandejuhtme mehaanilise pinge ja kontaktjuhtme rippe vältimiseks kontaktvõrgusüsteemi lisatavad mehaanilised automaatpingutid



Foto: Ain Köster

4.7. TOITEPIIRKONDAÜLENE LIIKUMINE

Elektriraudtee veolajaamad tagavad vedurile vajamineva toite kindlates kontaktvõrgu sektsioonides, mida nimetatakse veolajaama toitepiirkondadeks. Kontaktvõrk on kogu raudteeliini ulatuses normaalolukorras jagatud üksteisest isoleeritud toitepiirkondadeks, millest igaüht varustab energiaga veolajaam. Kõige efektiivsemaks veoenergia edastuseks on kesктоitega kontaktvõrgu sektsioonide rakendamine, kus veolajaam on paigaldatud kontaktvõrgu sektsiooni keskele. Seesuguse lahendusega saavutatakse veoenergiasüsteemis parim võimalik energia jaotamine, kus pingelang kontaktliini igas punktis on väikseim võimalik ning seda minimaalselt võimalike veolajaamade arvu juures.

Rongi liikumine ühest toitepiirkonnast teise toimub reeglina üle sektsioneeriva isoleervahemiku (joonis 4.5) kontaktliinis. Kontaktliini sektsiooni optimaalseks pikkuseks vahelduvvoolu 25 kV 50 Hz raudteesüsteemis on 50 km, seega on veolajaama toiteraadiuseks kuni 25 km. Tehniliselt on veolajaama toitepiirkonda võimalik ka pikendada ning kontaktvõrgu sektsioone omavahel ühendada. Normaalolukorras pole aga sektsioonide pikendamine otstarbekas, sest toob endaga kaasa nii töökindluse kui ka energia kvaliteediprobleeme. Pikemates kontaktliini sektsioonides tekkiva pingelangu tõttu ei suudeta vedurile tagada toitepinge piisavat väärtust kontaktliini kaugemates punktides. Samuti suureneb kontaktliini sektsioonide pikenedamisega rikete tõenäosus ning viimaste leidmine ja likvideerimine võtab kordades rohkem aega.

Joonis 4.5.
Kontaktvõrgu
toitepiirkondi
eraldav sektsioneeriv
isoleervahemik



Foto: Ain Köster

Elektriraudtee koormuse siirdumine ühe veolajaama toitel teisele põhjustab pinge väärtuse kõikumisi liinis ja toitealajaamades. Koormuse lahkumine alajaama toitepiirkonnast toob endaga kaasa pinge väärtuse tõusu, vastupidi koormuse sisenemisega alajaama toitepiirkonda, mil pinge väärtus langeb. Pinge kõikumise ulatus sõltub koormuse suuruselt, aga ka alajaamade elektrilisest tugevusest – elektriliselt nõrgad alajaamad on koormuse siirdumisest tulenevatele pinge kõikumistele tundlikumad.

5 Tehniline analüüs

5.1.	Mudelite koostamine ja modelleerimise lähtekohad.....	34
5.1.1.	Ülekandevõrk.....	34
5.1.2.	Vedurid.....	42
5.1.2.1.	Vedurite karakteristikud.....	42
5.1.2.2.	Veduri modelleerimismudel.....	44
5.1.3.	Kontaktvõrk.....	45
5.2.	Simulatsioonistsenaariumid.....	48
5.2.1.	Elektriliinide ülekandevõimsus.....	48
5.2.2.	Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitus.....	49
5.2.3.	Vedurite regeneratiivne pidurdamine.....	49
5.2.4.	Pingeasümmeetria.....	50
5.2.5.	Toitepiirkondadeülene liikumine.....	51
5.3.	Tulemused ja tähelepanekud.....	51
5.3.1.	Elektriliinide ülekandevõimsuse hinnang.....	51
5.3.2.	Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse mõju.....	52
5.3.3.	Vedurite regeneratiivsest pidurdamisest tingitud mõju.....	53
5.3.4.	Pingeasümmeetria mõju ülekandevõrgule ja generaatorite talitlusele.....	54
5.3.5.	Toitepiirkondadeülese liikumise mõju.....	55
5.3.6.	Mõjud ülekandevõrgu teistele tarbijatele.....	56

Elektriraudtee on oma olemuselt ja talitluselt ülekandevõrgu tavapäraest tarbijatest erinev. Tege- mist on ühefaasilise, ajas muutuva ja pidevalt liikuva koormusega. Eesti ülekandevõrgu seisukohast on sellise koormuse elektrivõrku ühendamisel oluline hinnata viimasele kaasnevaid mõjusid. Tehnilise analüüsi läbiviimine nõuab sobivaid ja piisava täpsusega modelleerimismudeleid nii elektrivõrgule kui ka elektriraudteesüsteemile. Elektriraudtee talitlusest tulenevate mõjude hindamiseks on tarvis vaadelda erinevaid elektriraudtee talitusrežiime ning analüüsida nendega kaasnevate mõjude ulatust. Hinda- maks elektriraudtee koormuse Eesti elektrivõrku ühendamisel kaasnevaid mõjusid, on *PSCAD* tarkvaras koostatud sobivad modelleerimismudelid ning vastavalt elektriraudtee talitusrežiimidele on analüüsitud erinevaid simulatsioonistsenaariume.

5.1. MUDELITE KOOSTAMINE JA MODELLEERIMISE LÄHTEKOHAD

PSCAD tarkvaras koostatud mudelid on mahukad ja komponentide poolest keerukad. Simulatsioonide läbiviimine nõuab suurt arvutusvõimsust ja on ajaliselt mahukas. Neist asjaoludest tulenevalt on mudelite koostamisel tarvis seada piiranguid ning teha teatavaid lihtsustusi. Võimalikult täpsete tulemuste saamiseks on olulisel kohal komponentide parameetrite valik ning modelleerimismudelite korrektne seadistamine.

5.1.1. Ülekandevõrk

Elektriraudtee kontaktvõrgusüsteemi toidetakse kõige kõrgema võimaliku pingeastmega elektrivõrgust, milleks *Rail Balticu* planeeritava trassilahenduse juures on Eestis 110 kV ülekandevõrk. Elektriraudtee mõju hindamiseks ja analüüsimiseks on kasutatud võrguarvutustarkvara *PSCAD*. Tulenevalt *Rail Balticu* trassivariantidest on analüüsi läbiviimiseks modelleeritud trassilähedane 110 kV elektrivõrk ning ülejää- nud elektrivõrk on ekvivalenteeritud ja modelleeritud süsteemi äärepunktidesse. Modelleeritud ei ole 330 kV ülekandevõrku ega ka valdavat osa Ida- ja Lõuna-Eesti 110 kV elektrivõrgust.

Liitumisalajaamade määratlemine

Rail Balticu projekti raames rajatavale elektriraudteeliinile sobivate ülekandevõrgu liitumispunktide ehk liitumisalajaamade määratlemine on olulise tähtsusega. See ülesanne on oluline nii raudteeliini planeerimisel, selle tehnilise lahenduse väljatöötamisel, aga eelkõige ülekandevõrgule elektriraudteesüsteemi talitlusest tulenevate mõjude hindamisel. Ülekandevõrgu mudeli koostamisel ja liitumisalajaamade

määratlemisel on arvesse võetud analüüsi läbiviimise ajaks avalikustatud planeeritava raudteeliini trassi variante, kus on tuginetud 2013. aasta augustis välja antud *Rail Balticu* 1435 mm trassi Harju, Rapla ja Pärnu maakonna planeeringute koondkaardile [68].

Vastavalt avaldatud *Rail Balticu* trassi variantidele, on võimalike liitumispunktide valikul lähtunud elektriraudtee trassile lähemal paiknevatest alajaamadest. Eelduseks on võetud alajaama N-1 varustuskindluse kriteeriumi täitmine ning minimaalselt kahe alajaama siseneva toiteliini olemasolu. Liitumisalajaamade määratlemisel on tähelepanu pööratud nende elektrilisele tugevusele ehk minimaalsele ja maksimaalsele lühisvõimsusele alajaama lattidel. Seejuures on eeldatud, et elektriliselt tugevate alajaamade korral on elektriraudtee talitlusest tingitud mõjud väiksemad.

Lähtudes *Rail Balticu* trassi variantide koondkaardist ja trassi lõikude tähistusest [68], võib kogu vaadeldava piirkonna üldistatult jagada kolmeks: Harjumaa, Raplammaa ja Pärnumaa piirkond. Tallinna ja Harjumaa piirkonnas on trassi alternatiivsetest variantidest analüüsitud lõike 12A ja 9A-11C, Raplammaa piirkonnas on vaadeldud lõike 8A-6A, 8A-6B ja 8B-6B, Pärnumaa piirkonnas lõike 4D, 5A-4A ja 5C-4G ning Pärnust lõuna poole Läti piirini lõiku 4A-1A. Nendel lõikudel on vaadeldud Eesti 110 kV ülekandevõrgu lähedal paiknevaid potentsiaalseid elektriraudtee liitumiseks sobivaid alajaamasid. Eelduseks on juba eespool kirjeldatud kontaktvõrgu kesktoitesüsteem, kus alajaama optimaalseks toiteraadiuseks on 25 km. Elektriraudtee liitumisalajaamade määramisel on ühtlasi arvestatud nende toiteraadiuse kattuvust trassi võimalike alternatiivsete variantidega.

Trassi alternatiivsete variantide ja ülekandevõrgu analüüsi [46] põhjal on määratud elektriraudteesüsteemi liitumiseks potentsiaalsed sõlmajaamad, mis on kajastatud tabelis 5.1 koos nende elektriliste parameetritega.

Tabel 5.1.
Potentsiaalsete
liitumisalajaamade
elektrilised parameetrid

Rail Balticu planeeritava raudteeliini trass				
Piirkond	Alajaam	Pingeaste	$S''_{k(max)}$ (MVA)	$S''_{k(min)}$ (MVA)
Harjumaa	Bus 7	330 kV	6088	4628
		110 kV	5422	2216
	Bus 4	110 kV	3848	2280
	Bus 2	110 kV	4990	3601
	Bus 6	110 kV	2672	1429
	Bus 14	330 kV	9021	5505
110 kV		4902	3291	
Raplamaa	Bus 21	110 kV	1414	940
	Bus 19	110 kV	815	514
	Bus 20	110 kV	952	283
Raplamaa	Bus 33	330 kV	5427	2320
		110 kV	1938	1062
	Bus 31	110 kV	1472	1181
	Bus 32	110 kV	1452	1054
	Bus 35	110 kV	1032	450

Tabelis 5.1 toodud andmete põhjal on näha, et Harjumaa piirkonnas on potentsiaalsetes liitumisalajaamades tagatud piisav elektriline tugevus elektriraudtee liitumiseks. Võib eeldada, et suuremaid probleeme selles piirkonnas elektriraudtee ühendamine ja selle talitlusest tulenevad mõjud ülekandevõrgule ei põhjusta.

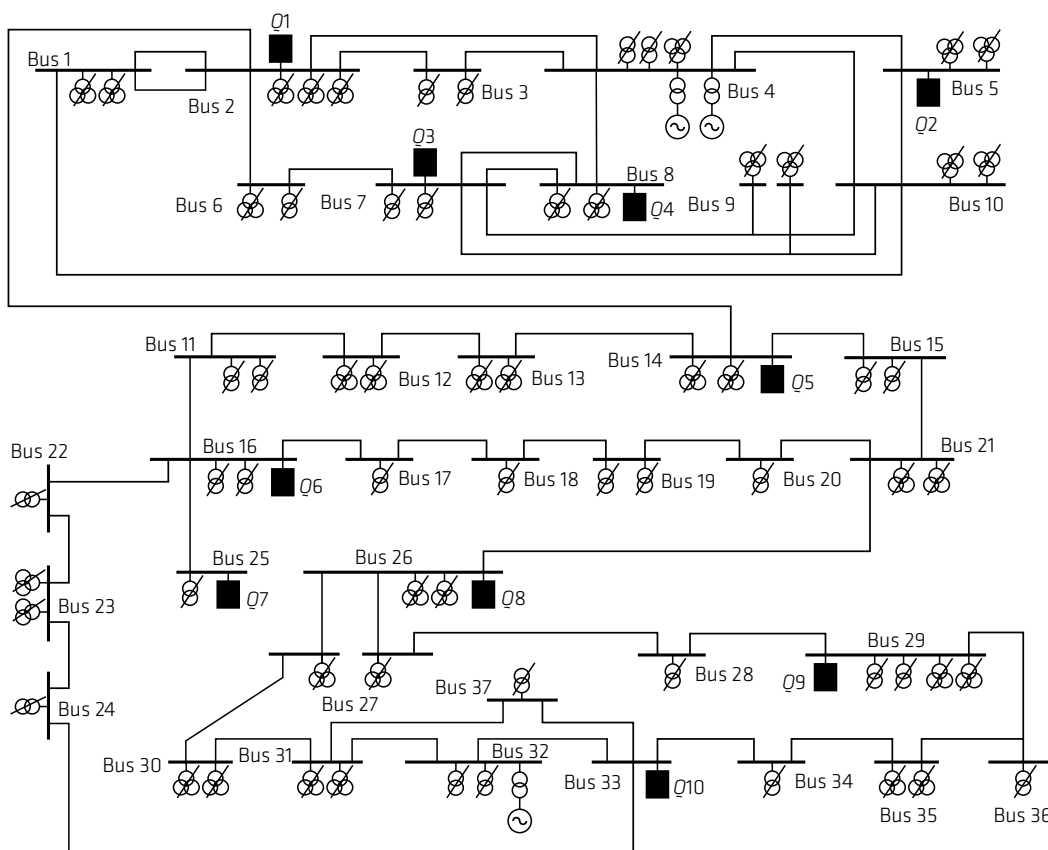
Erinevalt Harjumaa piirkonnast kajastuvad Raplammaa lõigul paiknevate alajaamade andmetest (tabel 5.1) nende madalamad lühisvõimsuse väärtused ($S''_{k(max)}$ ja $S''_{k(min)}$), mistõttu on võrreldes Harjumaa piirkonna alajaamadega tegemist elektriliselt nõrgemate alajaamadega. Raplammaa piirkonnas on raudteeliini toite tagamisel tegemist märgatavalt raskema olukorraga. Ülekandevõrgu alajaamade vaheline paiknemine on Raplammaa piirkonnas võrdlemisi hõre, toiteringid on pikad ning elektriline kaugus olulistest sõlmajaamadest on märgatavalt pikem.

Pärnumaa piirkonna alajaamad jäävad oma näitajate poolest kahe eelnevalt nimetatud piirkonna vahepeale. Probleemseks osutub aga Pärnust lõuna poole Läti piirini jääv piirkond, kus täna puuduvad või-

malused elektriraudtee toite tagamiseks. Seal puuduvad nii sõlmajajaamad kui ka ülekandevõrk. Lähim alajaam selles piirkonnas on Bus 35, mis jääb aga 25 km toiteraadiuse ulatusest välja. Lisaks on viimane kõigi vaadeldud alajaamade seast elektriliselt kõige nõrgem. Võib eeldada, et Bus 35 ei ole elektriraudtee koormuse liitumiseks sobiv alajaam.

Modelleeritud ülekandevõrku kajastab joonis 5.1, kus ülekandevõrgu alajaamasid tähistavad Bus 1–Bus 37. Süsteemi äärepunktidesse modelleeritud elektrivõrgu ekvivalente tähistavad Q1–Q10.

Joonis 5.1.
Modelleeritud 110 kV
ülekandevõrk



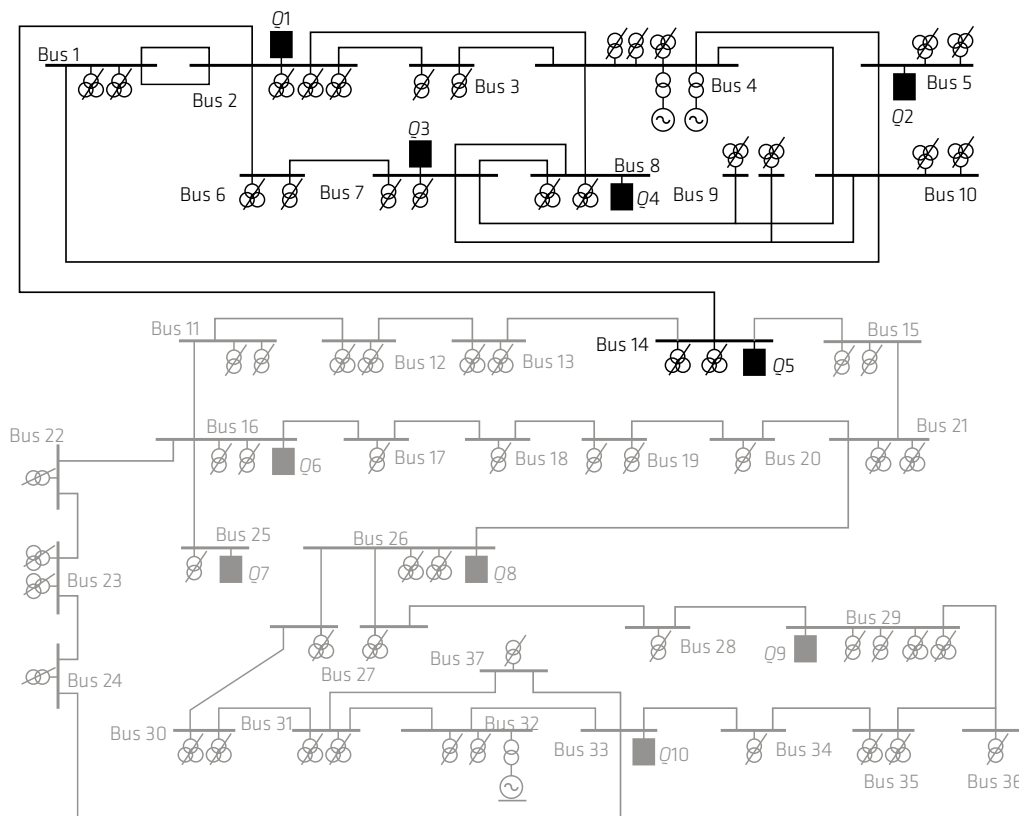
Süsteemi modelleerimisel kasutatud elektrivõrgu parameetrid vastavad reaalsele situatsioonile ning need on väljastanud Elering. 110 kV ülekandevõrgu mudeli koostamisel on täielikult modelleeritud 110 kV ülekandeliinid, trafod, jaotusvõrgu koormused, kondensaatorpatareid ning *Rail Baltico* planeeritava trassi läheduses elektrivõrku ühendatud koostootmisjaamade generaatorid (Bus 4, Bus 32).

Ülekandevõrgu jaotuspiir

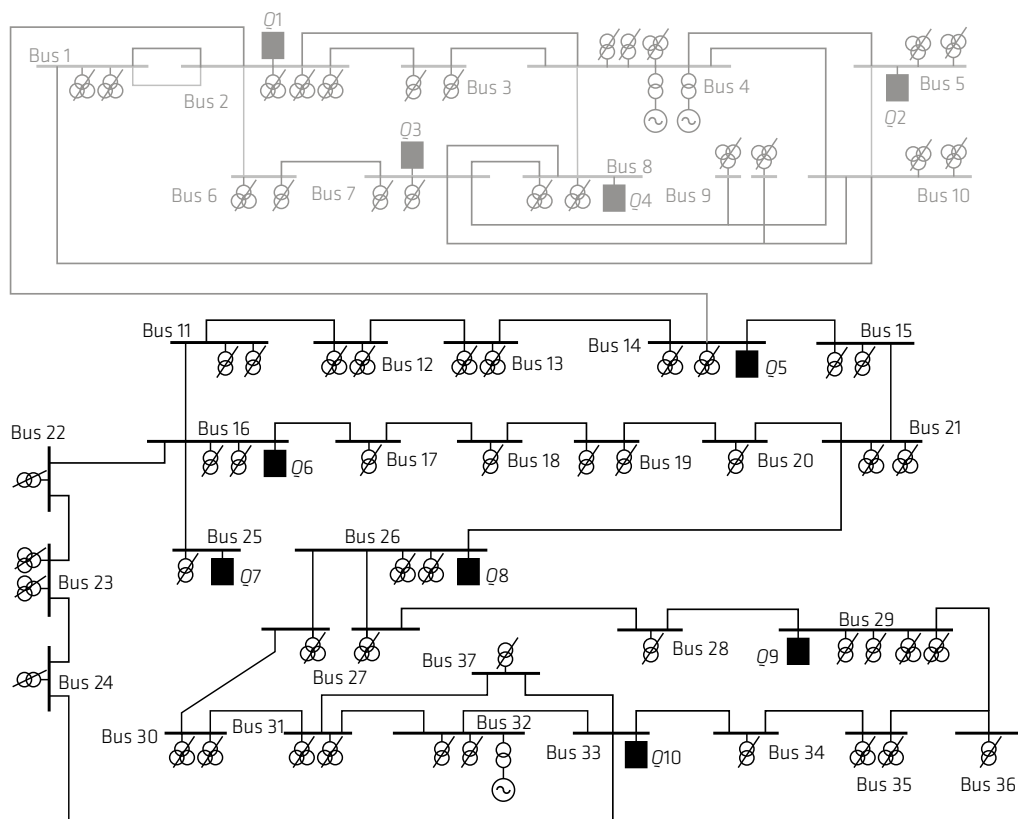
Elektriraudtee mõjude hindamiseks ülekandevõrgule on tarvis arvesse võtta suurt osa selle komponente, mis teeb analüüsimiseks koostatava mudeli keerukaks ja mahukaks. Modelleerimismudel sisaldab endas mitmeid alamoduleid ja süsteemi komponentidele eraldi koostatud mudeleid, mis muudab mudeli arvutuslikult suureks ning simulatsioonistsenaariumi arvutamine võtab ebamõistlikult palju aega. Mudeli efektiivsemaks kasutuseks ja simulatsioonide läbiviimiseks kuluva aja minimeerimiseks on tarvilik täiendavate meetmete kohandamine. Üheks nendest on ülekandevõrgu mudeli jaotamine kaheks eraldi modelleeritavaks osaks.

Tuginedes allikatele [45] ja [69] toodud ülekandevõimsuse ja pingesümmeetria analüüsile ning saadud tulemustele, selgub, et ülekandevõrk jaotub kaheks selgelt piiritletavaks osaks. Pingesümmeetria analüüsi tulemusest selgub, et elektriraudtee koormuse ühendamisel Põhja-Eesti ja Tallinna piirkonna liitumispunktidest ei kandu elektriraudtee koormusest tingitud mõjud edasi Põhja- ja Kesk-Eesti piirile jäävatesse Bus 21 ja Bus 13 alajaama. Analoogne olukord on näha ka elektriraudtee koormuse ühendamisel Bus 21 alajaama, millega ei kaasne märgatavat pingesümmeetria tõusu Põhja-Eesti piirkonna Bus 14 alajaamas ning Bus 13 alajaamas avalduv mõju on suurusjärgult võrdne arvutusveaga. Mainitust tulenevalt on otstarbekas jagada ülekandevõrk põhja- ja lõunaosa mudeliks.

Joonis 5.2.
 Modelleeritud 110 kV
 ülekandevõrgu põhjaosa



Joonis 5.3.
 Modelleeritud 110 kV
 ülekandevõrgu lõunaosa



Joonisel 5.2 kajastuv põhjaosa mudel hõlmab Tallinna ja Harjumaa piirkonna ülekandevõrku ning lõunaosa mudel joonisel 5.3 Rapla- ja Pärnumaa ülekandevõrku. Optimaalseimaks jaotuspunktiks osutub Bus 14 alajaam. Viimane on piirkonnas elektriliselt kõige tugevam (minimaalse lühisvõimsusega 3291 MVA) alajaam. Lisaks on lähteandmete põhjal teada selle alajaama ülekandevõrgu 330 kV ühendust iseloomustav ekvivalent. Tolle jaotuspiiri sobivust kinnitavad ka analüüsi [46] tulemused, millest selgub, et elektriraudtee koormuse liitumine ei avalda Bus 14 alajaamale märkimisväärset mõju, mistõttu jaotuspiiriga ei kaasne olulist muutust mudeli täpsuses. Modelleerimistulemuste täpsuse tagamiseks on Bus 14 alajaam kaasatud nii põhja- kui ka lõunaosa mudelites, kuid omab nendes erinevat konfiguratsiooni vastavalt vaadeldava mudeli vajadustele. Mõlemas mudeliosas on Bus 14 alajaama modelleerimisel tagatud nõutav täpsus, mille saavutamise põhimõtet on detailsemalt selgitatud allikas [70].

Ülekandevõrgu ekvivalendid

Kogu Eesti 110 kV ülekandevõrgu modelleerimine pole mõeldav ning analüüsi puhul ka määrava tähtsusega. Seega on tulenevalt *Rail Balticu* trassist ja elektriraudtee mõjude analüüsi seisukohast huvi mittepakkuv ülekandevõrk modelleeritud ekvivalentpunktideks valitud alajaamade lattidele. Selleks on alajaamade lattidele arvatud ekvivalentsed päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistused, mille väärtusi kajastab tabel 5.2.

Ülekandevõrgu ekvivalentide seadistamisel on lähtutud Eleringi väljastatud 2020. aasta maksimaalsest koormusprognosist *PSS/E* tarkvara mudeli püsitalitlusarvutuse juures.

Tabel 5.2.
Elektrivõrgu ekvivalentsed takistused

Alajaam	Pärijärgnevuskomponent		Vastujärgnevuskomponent		Nulljärgnevuskomponent	
	R (Ω)	X (Ω)	R (Ω)	X (Ω)	R (Ω)	X (Ω)
Bus 14	0,47577	3,63789	0,48254	3,64112	0,14443	1,64358
Bus 16	12,8499	78,4688	13,1359	79,3627	2,624	12,8893
Bus 25	23,9455	47,2033	23,9292	47,1592	15,1894	47,7655
Bus 33	0,83591	13,2638	0,84827	13,2912	0,87312	8,60916
Bus 29	8,2348	26,2849	8,25098	26,3123	7,86956	30,5542
Bus 26	0,65739	6,44471	0,67086	6,47848	0,47186	4,81643
Bus 7	0,46302	5,87011	0,47426	5,8986	0,79705	10,8392
Bus 5	29,9077	46,3538	29,9299	46,3705	1,86363	11,9552
Bus 2	1,77154	6,465	1,7539	6,42194	1,04221	2,61642
Bus 8	2,25279	7,37485	2,23328	7,33344	2,25975	3,36048

Elektrisüsteemi ekvivalentide modelleerimiseks on *PSCAD* tarkvaras kasutatud kolmefaasilise pingeaallika mudelit (*Three-Phase Voltage Source Model 3*), mis võimaldab sisendinformatsioonina kasutada *Thevenin*'i teoreemi järgi ekvivalenteeritud elektrivõrgu takistusi.

Ekvivalentse pingeaallika pingeväärtuste ning faasinihkenurkade seadistamisel on aluseks võetud lähteandmetena esitatud püsitalitlusarvutused programmpaketis *PSS/E*. Mudeli konkreetsuse tagamiseks on oluline saavutada täpne koormusvoogude jagunemine ning õiged latipinged sõlmalajaamades. Korrektselt seadistamata ekvivalentide korral võivad tekkida talitlusrežiimid, mis ei ole omased reaalsele elektrivõrgule.

Ülekandevõrk on seadistatud kahes etapis, millest esimeses on rakendatud PI-kontrollereid, arutamaks iga ekvivalenti sobilik faasinihkenurk ning pingeväärtus vastavalt *PSS/E* püsitalitlusarvutustele. Võimalikult täpseks koormusvoogude jagunemiseks ning elektriraudteest tingitud mõjude selgeks avaldumiseks on parameetrid leitud ülekandevõrgule, jättes arvestamata sellega ühendatavat elektriraudteesüsteemi. Seadistamise teises etapis on PI-kontrolleritega arvatud parameetrid sisestatud ülekandevõrgu mudelite töös rakendatavatesse *PSCAD* tarkvara liuguri (*Slider*) mudelitesse, et vähendada ülekandevõrgus elementide arvu ning kiirendada mudeli arvutusprotsessi. Täpsema ülevaate ülekandevõrgu ekvivalenti faasinihkenurga ja pingeväärtuse seadistamisest ja selleks kasutatud regulaatorite põhimõtetest annab allikas [70].

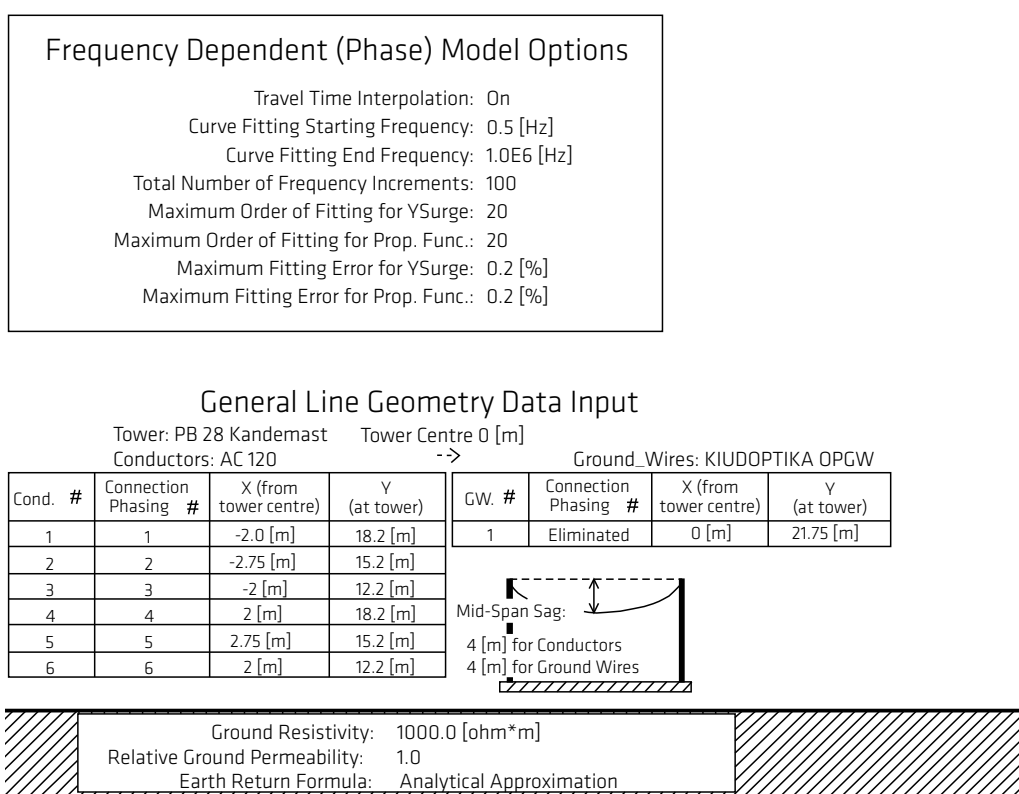
Lihtsustusena on ülekandevõrgu ekvivalentide seadistamisel mudeli jaotuspiiril Bus 14 alajaama koostatud ekvivalent võetud nii põhja- kui lõunaosa mudelis muutuvaks tugisõlmeks, mille väljundvõimsus ja pinged muutuvad vabalt, kompenseerimaks *PSS/E* ja *PSCAD* mudelite koostamise iseärasustest tingitud aktiivvõimsuse ja latipingete kokkulangematust. Viimane on tingitud tarkvarade erinevast ülekandeliinide modelleerimise põhimõttest. Nimelt *PSCAD* käsitleb õhuliine oluliselt täpsemalt kui *PSS/E*, seda just õhuliinide mahtuvuste modelleerimise seisukohast. See asjaolu põhjustab kahe erineva tarkvara toel koostatud mudelite reaktiiv- ja aktiivvõimsusvoogude jagunemises teatava erinevuse.

Elektrivõrgu ülekandeliinid

Elektriliinide modelleerimiseks on kasutatud *PSCAD* tarkvara standardõhuliini mudelit, kus õhuliinide parameetrid vastavad liini tegelikule geomeetria ja ligilähedasele maapinna eritakistusele. Seega on saadav tulemus täpsem ja vastab elektrivõrgu reaalse olukorrale. Õhuliini parameetrite arvutamiseks on valitud kõige täpsemad tulemusi andev sagedussõltuvust arvestav mudel (*Frequency Dependent (Phase) Model Options*), kus on tagatud õhuliini täpne esitus kõikides sagedusvahemikes ning tekkivate laineprotsessides.

Mudeli koostamisel on arvestatud Eesti 110 kV ülekandevõrgus esinevate kaheahelaliste liinidega, mis on samuti sisestatud vastavalt oma tegelikule geomeetria ja paralleelkulgemistele. Õhuliini geomeetriaandmete sisestamisel on rakendatud kõige universaalsemat, tabelil põhinevat meetodit. Joonisel 5.4 on toodud *PSCAD* tarkvara õhuliini mudeli põhikomponendid, milleks on mudeli üldised parameetrid, õhuliini geomeetria ja maapinna üldistatud mudel. Õhuliini rippe eelduseks on õhuliinide modelleerimisel valitud neli meetrit. Detailsete andmete puudumise tõttu võib esitatud keskmist suurust lugeda tüüpvärtuseks. Maapinna modelleerimisel on kõikide õhuliinide puhul valitud keskmiseks pinnase eritakistuseks 1000 $\Omega \cdot m$.

Joonis 5.4.
Õhuliini mudel *PSCAD*
tarkvaras



Tulenevalt modelleeritava elektrivõrgu keerukast struktuurist esineb piirkonniti õhuliine, mille kogupikkus on väiksem kui 10 km. Need õhuliinid on *PSCAD* tarkvarasisese algoritmiga konverteeritud spetsiaalseteks ekvivalentseteks PI-sektsioonideks. Selline konverteerimine mudeli koostamisel võimaldab modelleerimisel suurendada arvutussammu ja lühendada simulatsiooniaega. Olemuselt on mainitud PI-skeem klassikalise PI-skeemist täpsem, kuna *PSCAD* konverteerib õhuliini otse maatriksi kujule, samas kui klassikaline PI-skeem rakendab passiivelementidel põhinevat lähenemist. Tänu maatriksi kujule on PI-skeemis täpselt esitatud nulljärgnevustakistused, kuid lihtsustuse tõttu puuduvad sageduslikke laineprotsesse kirjeldavad osad. Arvestades elektrivõrgu konfiguratsiooni ja asjaolu, et konverteeritud õhuliinid on lühikesed, ei mõjuta tehtud lihtsustus olulisel määral ülekandevõrgu mudeli täpsust.

Lisaks õhuliinidele on 110 kV ülekandevõrgus ka kaabelliinid. Ülekandevõrgu kaabelliinid on modelleeritud *PSCAD* tarkvara (induktiivselt) sidestatud PI-skeemi standardmudeliga (*Coupled PI Section*). Võttes arvesse kaabelliinide geomeetria, materjalide ja ehituslike detailsete lähteandmete puudumist, on standardmudeli rakendamine sobivaim lahendus. Ühtlasi on selle mudeli kasutamine kaabelliinide modelleerimisel praktikas laialt levinud, kuna sisaldab nii induktiivseid kui ka mahtvuslikke sidestusi faaside vahel. Seeläbi on enamikul juhtudel tagatud arvutuste piisav täpsus. Faasidevaheliste sidestuste arvestamine on kaablite modelleerimisel oluline, kuna nii induktiivne sidestus kui ka faaside mahtvuu-

sed on kaabelliinide puhul võrreldes õhuliinidega oluliselt suuremad. Seega osutub klassikaline PI-skeem kaabelliinide modelleerimisel ebatäpseks, kuna oluline osa parameetritest jääb arvestamata.

Paratamatult on mudeli seadistamiseks vajalike nulljärgnevustakistuse parameetrite määramine keerukas, mistõttu tuleb kasutada estimateerimise funktsiooni. Viimane põhjustab küll teatavat ebatäpsust, kuid arvestades kaabelliinide lühikest kogupikkust, ei oma see märkimisväärset mõju ülejäänud mudeli täpsusele.

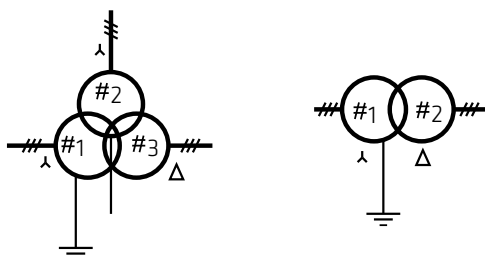
Ülekandevõrgu trafod

Ülekandevõrgu mudeli koostamisel on kaasatud ka ülekandevõrku kuuluvad jõutrafod, mille modelleerimisel on aluseks võetud Eleringi väljastatud elektrivõrgu skeem ja trafode nimiparameetrid. Ülekandevõrgu jõutrafode kaasamine mudelisse annab võimaluse hinnata elektriraudteesüsteemi tekitatavate mõjude edasikandumist ja leviku ulatust ülekandevõrgu poolelt jaotusvõrgu poolele.

Trafode modelleerimisel on kasutatud *PSCAD* tarkvara kolmefaasilisi standard-trafo mudeleid. Modelleeritavas elektrivõrgus on kasutusel kahte tüüpi trafosid (joonis 5.5), standardsed kahe- ja kolmemähiselised jõutrafod sõltuvalt sellest, mitu keskpingeastet alajaamas on.

Trafode modelleerimisel on lihtsustusena loobutud magnetimisahela ja pingeastme regulaatori modelleerimisest, vähendades nii mudeli arvutusmahukust. Kuna analüüsi fookus on eelkõige suunatud 110 kV võrgule, siis puudub otsene vajadus selles suunas täpsemaks modelleerimiseks.

Joonis 5.5.
Kahe ja kolme mähisega
jõutrafode mudelid
PSCAD tarkvaras



Jaotusvõrgu koormusmudelid

Tulenevalt elektriraudtee talituslikust omapärasest on selge, et elektriraudtee koormus avaldab mõju ülekandevõrgu pingele väärtusele, mistõttu võib eeldada, et mõjud kanduvad edasi ka ülekandevõrgutrafo sekundaarpoolele. Tehnilise analüüsi käigus on täiendavalt vaadeldud elektriraudtee talitlusest tingitud mõjusid ülekandevõrgust toidetavatele teistele tarbijatele, seega on mudelisse kaasatud ka jaotusvõrgu koormusmudelid.

Jaotusvõrgu koormuste modelleerimisel on aluseks võetud Eleringi väljastatud lähteandmed, miinimum- ja maksimumkoormusstsenaariumid 2020. aastaks. Tulenevalt analüüsi iseloomust on koormuste modelleerimisel lähtutud maksimumkoormusstsenaariumist.

Koormusmudeli võimsused on seadistatud võrgu normaalskeemi püsitalitlusarvutustele. Tingituna asjaolust, et lähteandmetega on koormuste väärtused väljastatud 110 kV alajaamade lattidele, on mudeli koostamisel väärtused jaotatud alajaama trafode vahel võrdselt. Mitme mähisega trafo korral on koormus jaotatud lineaarselt, mistõttu kõrgema pingeastmega mähised on enam koormatud kui madala pingeastmega mähised. Koormusmudelite nimipinge on seadistatud vastavalt trafode sekundaarpingele.

Jaotusvõrgu koormustele avalduvate häiringute tuvastamiseks ning toitepinge kvaliteedi muutuste hindamiseks on lisaks jaotusvõrgu aktiiv- ja reaktiivkoormusele tarvis arvestada ka võrgu mahtuvust ning genereeritud reaktiivvõimsust. Jaotusvõrgu mahtuvus on otseselt seotud selle konfiguratsiooniga ja liinitüübiga. Täieliku jaotusvõrgu mudeli integreerimine ülekandevõrgu mudelisse on paraku ebarealistlik, mistõttu kasutatakse modelleerimisel jaotusvõrgu ekvivalentseid mahtuvusi.

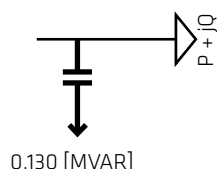
Jaotusvõrgu ekvivalentsed mahtuvused on määratud vastavalt maaühendusvoolule, mis isoleeritud neutraaliga võrgus sõltuvad liinide põikmahtuvusest [57]. Tänu maaühendusvoolu põhjal määratud põikmahtuvusele puudub jaotusvõrgu konfiguratsioonist lähtuvatele otsene vajadus konkreetsetele liiniparameetritele. See asjaolu muudab jaotusvõrgu koormusmudelite täpsustamise oluliselt lihtsamaks. Paraku ei ole selle meetodi rakendamisel määratud jaotusvõrgu õhuliinide täielikku mahtuvust, kuna põikmahtuvusest lähtuv maaühendusvool ei arvesta faasijuhtidevahelisi mahtuvusi [57]. Meetodi

rakendatavus kaalub aga üles kirjeldatud lihtsustusest tuleneva teatava ebatäpsuse, mis ei ole analüüsi iseloomule tuginedes märkimisväärne.

Jaotusvõrgu ekvivalentse mahtuvuse modelleerimisel on aluseks võetud osaühingu Elektrilevi väljastatud maaühendusvoolude väärtused Eleringi ülekandevõrgu liitumispunktides. Maaühendusvoolude väärtustest lähtuvalt on arvatud jaotusvõrgu ekvivalentsed mahtuvused ja nende põhjal genereeritav ekvivalentne reaktiivvõimsus nimitingimuste juures.

Jaotusvõrgu koormusmodel koosneb standardsest *PSCAD* koormusmodelist (joonis 5.6). Sellise mudeliga on modelleeritud jaotusvõrgu põikmahtuvus, mis võimaldab täpsustada jaotusvõrgu koormuse käitumist asümmeetrilise toitepinge korral.

Joonis 5.6.
Jaotusvõrgu koormus-
model *PSCAD* tarkvaras



Generaatorid

Peatükis 4.2 kirjeldatu põhjal selgus, et elektriraudtee talitlusest tingitud pingeasümmeetria avaldab olulist mõju elektrivõrku ühendatud koostootmisjaamade generaatoritele. Analüüsi läbiviimiseks on Bus 4 ja Bus 32 lattidele ühendatud generaatoritele koostatud vastavad mudelid. Need soojusjaamad on modelleerimise seisukohalt sarnased, nimiparameetritega vahemikus 17–25 MW. Jaamade täpsete mudelite rakendamiseks puuduvad aga andmed, seega on 25 MW nimivõimsusega agregeeritud generaatorite mudelite koostamisel lähtutud kirjandusallikatest kättesaadavatest andmetest ning tuginetud kogemuslikule informatsioonile selles valdkonnas.

Sünkroongeneraatori modelleerimisel on aluseks võetud Siemens AG SGen5-100A-4P turbogeneraator, mille olulisimad nimiparameetrid on ära toodud tabelis 5.3. Selle generaatori nimivõimsus on küll suurem kui olemasolevate koostootmisjaamade nimivõimsus, kuid ülekandevõrgu mudeli koormusvoolude jagunemise täpsuse tagamiseks piiratakse modelleerimisel generaatori väljundvõimsust kiirusregulaatori mudelis.

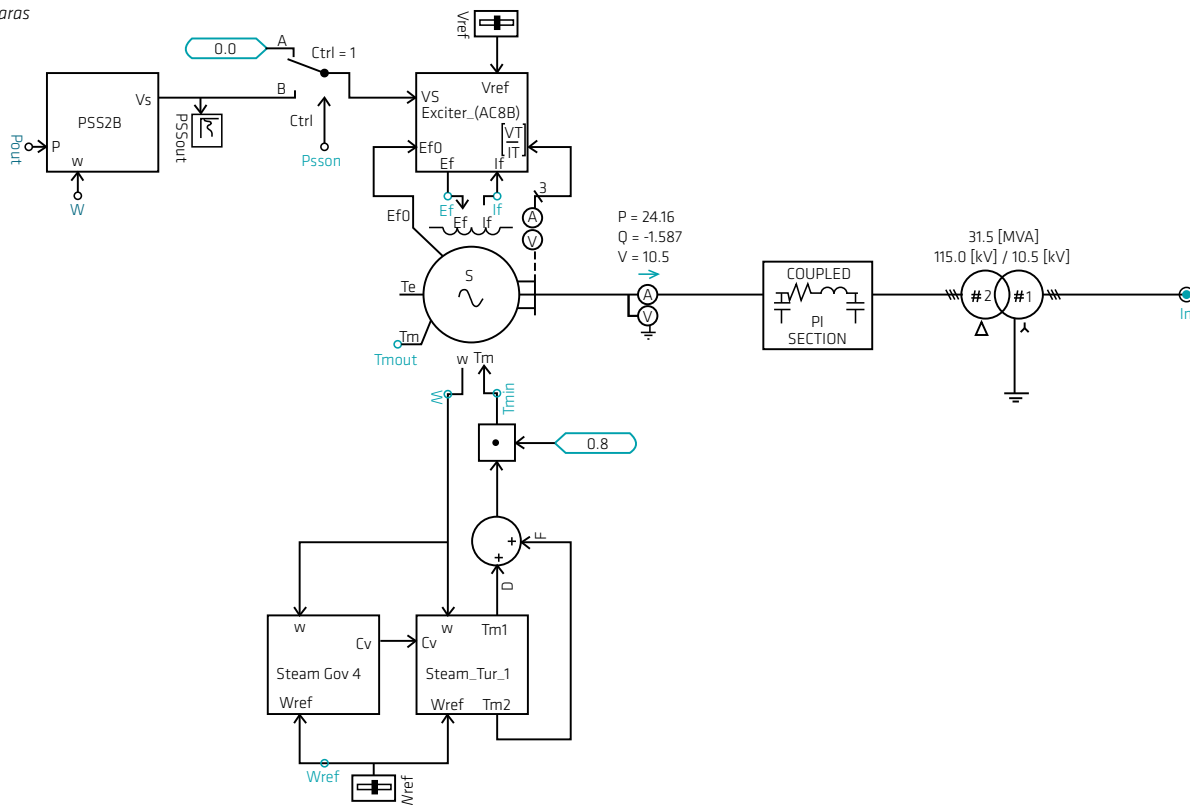
PSCAD tarkvaras koostatud agregeeritud generaatori mudeli käitumise tulemusi on põhjalikult analüüsitud, hindamaks mudeli vastavust võrgueeskirja nõuetele [71]. Allikas [70] kirjeldatud põhjaliku analüüsi tulemused annavad kinnitust, et koostatud teoreetiline mudel täidab võrgueeskirjas esitatud nõudeid ning seega on mudel tehnilise analüüsi läbiviimiseks sobiv.

Tabel 5.3.
Agregeeritud generaatori
nimiparameetrid

Niminäivvõimsus S_n	30 800 kVA
Nimipinge U_N	10,5 kV
Võimsustegur	0,85
Nimivool I_N	1 694 A
Nimisagedus f	50 Hz
Nimipöörlemiskiirus n	1500 min ⁻¹

Mudeli koostamisel on kasutatud *PSCAD* tarkvara standardseid komponente generaatori, ergutussüsteemi, võnkesummuti, kiirusregulaatori ja auruturbiini modelleerimiseks (joonis 5.7). Detailsem ülevaade agregeeritud generaatori mudelist ja selle modulite seadistamisest on ära toodud allikas [70].

Joonis 5.7.
Agregeeritud generaatori
mudel PSCAD tarkvaras



5.1.2. Vedurid

Elektriraudtee veduri elektrienergia tarbimine sõltub peamiselt rongi massist, liikumise kiirusest ja kiirendusest. Vedurid projekteeritakse vastavalt veduri klassile ette nähtud nimimassile ja -kiirusele, arvestades veduri maksimaalset kasutegurit. Normaallolude juures on veduri energiatarve minimaalne püsikiirusel ja maksimaalne kiirendamisel. Lisaks mõjutab energiatarvet raudteeliini trass, näiteks selle kurvide raadiused ning kõrgusevahed, aga ka tuule kiirus ja suund ning rongi välispind ja selle aerodünaamilised omadused.

Veduri mudeli koostamiseks määratud nimiparameetrid on ära toodud tabelis 5.4. Need parameetrid on kohandatavad tüüpilisele reisirongile maksimaalkiirusega 220 km/h ja keskmisele kaubarongi vedurile. Mudelite koostamisel määratud veduri parameetrite vastavust on kinnitanud ka *Rail Balticu* projekti kaasatud Rootsi konsultandid ettevõtte *WSP Group*, kelle andmetel on elektriraudteel kasutatava veduri keskmiseks nimivõimsuseks 5 MW (suurematel kaubarongidel 7–8 MW).

Elektriraudteest tingitud mõjude analüüsimiseks on PSCAD tarkvaras koostatud veduri mudel, mille juures on lähtutud veduri kiirendus- ja pidurduskarakteristikutest ning vedurite modelleerimise põhimõtetest.

5.1.2.1. Vedurite karakteristikud

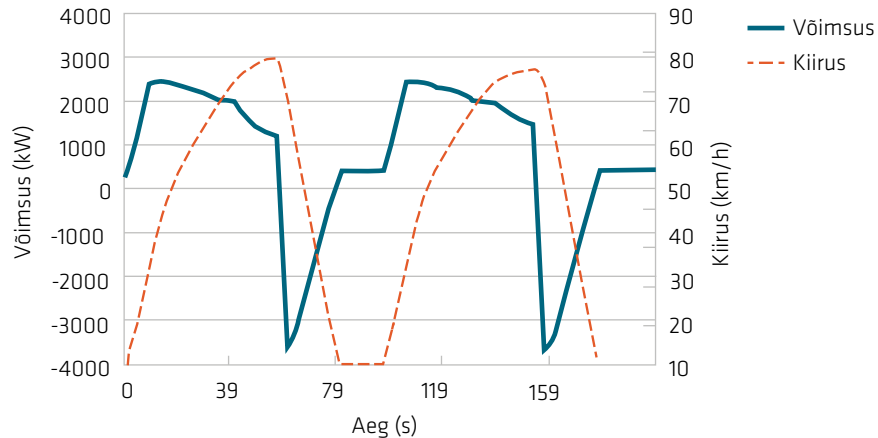
Kiirenduskarakteristik

Elektrirongi ajamite võimekust iseloomustavad rongi kiirenduskarakteristikud. Kiirendamisel viiakse veduri ajami veojõud maksimaalväärtuseni. Veduri maksimaalse kiirenduse määravad ära ajami ja mootori tehnilised piirangud ning raudteerööbaste ja veduri vedavate rataste vahel tekkiv hõõrdejõud. Lubatud maksimaalse kiirenduse piirang tuleneb peamiselt mugavuse tagamisest reisijatele ning kaubarongide puhul kauba käitlemise nõuetest, jäädes enamasti vahemikku 1–1,5 m/s² [34]. Rongide kiirenduskarakteristikud kajastavad veojõu sõltuvust kiirendusest ja need esitatakse vastavalt veduri tüübile, enamasti graafilisel kujul.

Elektrivedurite puhul eristatakse kahte koormuse põhiliiki: maksimaalse jõumomendiga ja pideva veojõuga sõit. Joonis 5.8 kujutab veduri poolt tarbitava võimsuse sõltuvust veduri kiirusest. Veduri kiirendamine jagatakse kaheks, esimesel perioodil, alates nullist kuni hetkeni, mil vedur saavutab poole oma

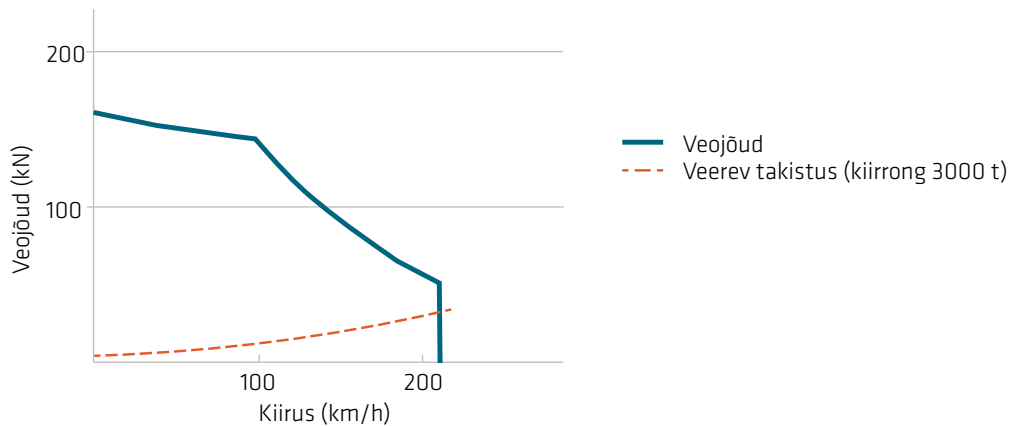
maksimaalkiirusest, on tarbitava võimsuse ja kiiruse vaheline sõltuvus lähedane lineaarsele sõltuvusele. Kiiruse edasisel kasvamisel muutub tarbitav võimsus pöördvõrdeliseks kiirusest, teisisõnu veduri kiiruse suurenemisel tarbitav võimsus väheneb.

Joonis 5.8.
Veduri võimsustarbimise sõltuvus kiirusest [72]



Joonisel 5.9 toodud graafik kirjeldab aga veduri veojõu väärtuse sõltuvust kiirusest. Graafikult on näha, et kiiruse algasel kasvamisel on veojõu väärtuse muutus tähtsusetu seniks, kuni vedur saavutab poole oma maksimaalsest kiirusest. Kiiruse edasisel kasvamisel veduri veojõud aga väheneb märgatavalt. Sel perioodil saavutab vedur ühtlasi ka oma maksimaalse kasuteguri.

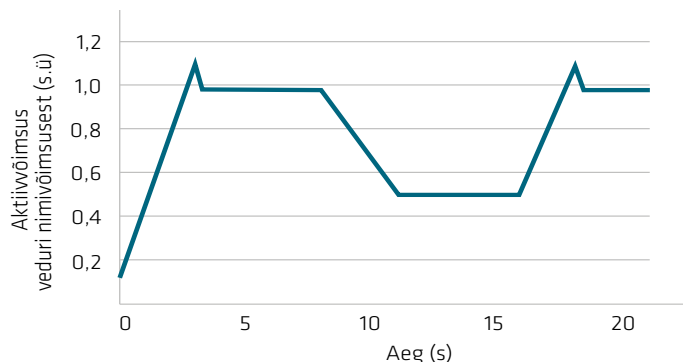
Joonis 5.9.
Veduri veojõu väärtuse sõltuvus kiirusest [34]



Koormuskarakteristik

Lähtudes kättesaadavast veduri kiirendus- ja pidurduskarakteristikust (joonis 5.8), on tehnilise analüüsi läbiviimiseks modelleeritavale vedurile koostatud suhtühikutele vastav koormusgraafik (joonis 5.10). Modelleerimiseks sobiva koormusgraafiku koostamisel on vähendatud veduri püsitalitluse ning lineaarselt kasvavaid ja kahanevaid perioode, et kiirendada simulatsiooniprotsessi ning vähendada mudeli mahtu. Iga modelleeritud režiimi kestvuseks on võetud 3–4 sekundit. Vedurile koormuskarakteristiku koostamine on vajalik, hindamaks elektrivõrgule avalduvaid mõjusid tulenevalt koormuse muutusest elektriraudteesüsteemi siseselt. Joonisel 5.10 kujutatud suhtühikutele vastav veduri koormusgraafik kirjeldab mudeli käitumist 21 sekundi pikkuse tsükliks.

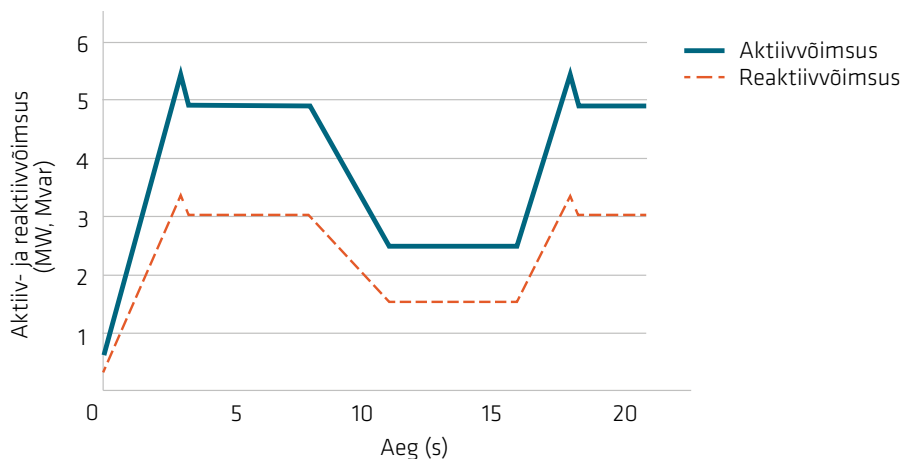
Joonis 5.10.
Veduri koormusgraafik suhtühikutes



Perioodil 0–3 sekundit leiab aset veduri kiirendamine kuni maksimaalse kiiruse saavutamiseni. Selles ajavahemikus suureneb tarbitav aktiivvõimsus nimivõimsusest 10% võrra. Järgnevalt toimub viiesekundiline kulgemine stabiilsel koormusel (3–8 sekundit) ning seejärel lineaarne koormuse vähendamine 50% ulatuses nimivõimsusest, olenevalt veduri pidurdamisel tekkiva hõõrdejõu ja tuuletakistuse mõjust. Pärast viiesekundilist stabiilset kulgemist leiab aset järjekordne kiirendamine maksimaalse kiiruseni ning sellele järgneb stabiilne kulgemine koormusega 98% nimivõimsusest.

Võttes arvesse veduri nimivõimsust ja võimsustegurit, on vedurile koostatud koormusgraafik, mis on kujutatud joonisel 5.11.

Joonis 5.11.
Veduri koormusgraafik



5.1.2.2. Veduri modelleerimismudel

Veduri modelleerimisel saavutatakse kõrgeim võimalik täpsus, võttes arvesse iga veduri komponenti eraldi. Tegemist on detailse mudeliga, mille trafo, konverterid ja mootor on modelleeritud eraldi. Paraku nõuab sellise meetodi rakendamine komponentide täpseid parameetreid. Tulenevalt tootjate ärisaladusest puudub aga avalikkusele kättesaadav informatsioon vedurite ajamite ja mootorite tehniliste andmete kohta [34]. Ühtlasi kajastaks niimoodi koostatud mudel ühe konkreetse veduri käitumist ning veduri tüübi muutmisel tekib vajadus uue mudeli järele.

Alternatiivseks lahenduseks veduri modelleerimisel on seda vaadelda kui terviklikku tarbijat. See meetod on sobilik just nendel juhtudel, kui puuduvad veduri konkreetsed andmed. Veduri kui tervikliku tarbija modelleerimiseks on rakendatud näivtakistusel põhinevat matemaatilist mudelit [73]. Näivtakistuse mudelis kasutatakse nelja parameetrit, kus takistuse väärtus arvutatakse pinge ja voolu suhte kaudu ning faasinurk määratakse lihtsustatult läbi võimsusteguri. Näivtakistuse mudel on võrdlemisi lihtne ja ei vaja suurt andmebaasi ega mahukaid arvutusi [74]. Juhitavatest R ja L elementidest koosnev koormusmudel on seadistatud nõnda, et parameetrite muutused kirjeldaksid võimalikult realistlikult veduri koormust. Teades veduri koormusgraafikut ning kiirendus- ja pidurduskarakteristikut, on koostatud mudelit võimalik kohandada konkreetsele veduri tüübile.

Elektriraudteesüsteemides tekitavad probleeme kõrgemad harmoonikud, mille allikateks on tänapäeva vedurites kasutusel olevad jõuelektroonika komponendid. Veduri poolt võrku edastavate harmoonikute hindamiseks on *PSCAD* tarkvaras veduri mudelile lisatud harmoonikute modelleerimist võimaldav blokk, mille abil saab mõõta nii nimisageduse kui ka kõigi nende harmoonikute päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponendi amplituudväärtusi ning nende faasinihkenurkasid. Detailsema ülevaate vedurite modelleerimismudelitest ja juhtimisahelate koostamisest ning nende seadistamisest annavad [46; 70].

Regeneratiivne mudel

Veduri mudel on koostatud analüüsimaks elektriraudtee mõju olemasoleva elektrivõrgu talitlusele eeldusel, et kõige suuremad mõjud elektrisüsteemile on elektriraudtee veduri regeneratiivsel pidurdamisel ja tarbitava võimsuse laiaulatusliku muutumise korral. Viimane leiab aset, kui liinirassil esinevate kurvide või pöörete tõttu tuleb ajutiselt vähendada rongi kiirust, misjärel koormust jällegi suurendatakse nimiparameetriteni.

Veduri regeneratiivse pidurdusrežiimi käsitlemiseks on koostatud ühefaasilisel juhtival pingemaalil põhinev mudel, mis järgib eespool toodud veduri koormusgraafikut (joonis 5.11). Juhtival pingemaalil põhineva veduri regeneratiivsesse mudelisse sisestatud takistuste väärtused on konstantsed ning karakteristi-

kujärgne juhtimine korraldatakse võimalikult väikese arvu pinge- ja voolumaatriksite väärtuste muutmiseks. Viimane võimaldab oluliselt kiirendada modelleerimisprotsesside läbiviimist. Veduri aktiiv- ja reaktiivvõimsust juhitakse vastavalt faasinihkenurga ja pinge efektiivväärtuse kaudu.

Mudeli koostamisel on kasutatud *PSCAD* tarkvara standardset pingevalik mudelit (*Voltage source model* 1), mis on omadustelt sobivaim. Pingevalik mudeli eripäraks on sisetakistuse aktiiv- ja induktiivkomponentide paiknemine paralleelühenduses, mis võimaldab täpsemat pingevalik reguleerimist kui komponentide jadaühendus, kuna esimesel juhul on pingevalik aktiiv- ja reaktiivvõimsus faasinurga ja pingevalik amplituudväärtuse muutusega vähem seotud. Veduri regeneratiivse mudeli ja pingevalik juhtimissüsteemi põhimõtet kirjeldab detailsemalt allikas [70].

Veduri regeneratiivne mudel võimaldab pidurdamist vaadelda kahes režiimis. Nendest esimesel juhul muutub veduri reaktiivvõimsus proportsionaalselt tarbitava või genereeritava aktiivvõimsusega. Seda režiimi tähistab *Con S*, kus pingevalik faasipinge juhtimissüsteem reguleerib mudeli väljundreaktiivvõimsust vastavalt koostatud karakteristikule. See pidurdusrežiim on omane vanemat tüüpi vedurites rakendatud ajamitele.

Tänu täielikult juhtivale pingevalikale on veduri regeneratiivset pidurdust võimalik modelleerida aga ka *Con V* režiimis, kus pingeregulaatori maksimaalse võimsusteguri korral tarbib vedur vaid aktiivvõimsust. *Con V* režiim võimaldab modelleerida uuemat tüüpi ajameid, kus pingemuundurtehniloogia (*VSC – Voltage Source Converter*) põhinevas ajamis on juhtimissüsteemis kasutada kaks vabaduse astet. Ühte nendest kasutab veosüsteem tarbitava aktiivvõimsuse juhtimiseks ning teist veduri võimsusteguri või kontaktvõrgu pingevalik juhtimiseks.

Con S juhtimisrežiimis talitleb faasipinge PI-regulaator analoogselt faasinihkenurga regulaatoriga ning stabiilne talitusrežiim saavutatakse juhul, kui reaktiivvõimsuskarakteristiku järgi nõutud ja mõõdetud pärijärgnevuskomponentide vahe on võrdne nulliga. Kontaktvõrgu pingevalik muutub selles režiimis vastavalt tarbitud ja genereeritud näivõimsusele. *Con V* juhtimisrežiimis arvutatakse konstantse kontaktvõrgu faasipinge alusel stabiilne talitusrežiim, milles veduri maksimaalne võimsustegur saavutatakse võimsuse tarbimise režiimis.

5.1.3. Kontaktvõrk

Veotrafod

Elektriraudtee kontaktvõrkudes enim kasutatust leidvaid veotrafode tüüpe ja nende süsteemiga ühendamise põhimõtteid kajastab peatükk 2.2. Elektriraudtee talitlusest tingitud mõjude hindamiseks on analüüsi käigus lähemalt vaadeldud ühefaasilist jõutrafo ja eri tüüpi *Scott*-trafot. Auto- ja V-ühendusega trafod, mis leiavad samuti raudteesüsteemides rakendust, on oma tööpõhimõtetelt sarnased jõu- ja *Scott*-trafole. Seega on mõjude analüüsimisel saadavad tulemused sarnased [46] ning auto- ja V-ühendusega trafode talitlust pole järgnevalt eraldi analüüsitud.

Ühefaasilise jõutrafo ja *Scott*-trafo mudelid *PSCAD* tarkvaras on koostatud eraldi alamoodulitena, mis lihtsustab nende lisamist ja asendamist kontaktvõrgusüsteemi mudelis. Elektriraudtee trafode modelleerimisel on lähtutud sellealases kirjanduses avaldatud andmetest. Veoalajaama trafode nimivõimsus jääb enamasti vahemikku 10–60 MVA [19]. Laialdasemat rakendust leidvate trafode nimivõimsused on 20 MVA ja 60 MVA [20; 27; 75–77], seda nii ühefaasilise kui ka eri tüüpi trafode korral. Veoalajaamade võimsuse määramine sõltub elektriraudteeliinil sõitvate rongide võimsusevajadusest, nende liikumisgraafiku tihedusest ja arvust veoalajaama toitepiirkonnas. Analüüsi käigus modelleeritud trafode nimiaandmed on leitavad tabelis 5.5, kus parameetrite valikul on lähtutud allikast [77]. *Rail Baltic* projekti planeeringutesse kaasatud ettevõtte *WSP Group* ekspertide hinnangul on planeeritavast *Rail Baltic* koormusest ja liiklustihedusest lähtudes piisavaks veoalajaamade nimivõimsuseks Harjumaa piirkonnas 20 MVA ning Rapla- ja Pärnumaa piirkonnas 10 MVA, arvestades sealjuures teatavat varu koormuste võimaliku perspektiivse suurenemise puhuks.

Tabel 5.5.
Trafode nimiaandmed

Trafo tüüp	S_n (MVA)	U_n (kV)	U_{n2} (kV)	f (Hz)	P_0 (kW)	P_k (kW)	U_k (%)
Ühefaasiline jõutrafo	25	115	27,5	50	30	140	10
<i>Scott</i> *	25	115	27,5	50	30	140	10

* Andmed on toodud ühe trafo kohta trafoühenduses.

Kontaktliin

Kontaktvõrgusüsteemiga tagatakse vedurile energia ülekanne. Kontaktvõrgu modelleerimine on keeruline ülesanne, kuna õhuliinidest koosnev kontaktliinisüsteem sisaldab palju paralleelseid juhte, mis omavad erinevaid potentsiaale, vahekaugusi ja ristlõikeid. Nendeks on fiidriin (F) ehk abitoite-liin, kontaktõhuliin (OC), kande- (K), maandus- (G) ja tagasisivoolujuhe (T) ja lisaks relsid (R1, R2). Kahe rööpapaariga raudteeliini puhul on tegemist sümmeetrilise süsteemiga, kus kontaktliinis on vastavad juhid mõlemal rööpapaaril (joonis 2.1). Juhtide ühikuline aktiivtakistus R on tootja kataloogidest leitav vastavalt juhtme margile ja materjalile.

Kontaktliini mudeli koostamisel on juhtmete margi ja ristlõike valikul tuginetud kirjandusest kättesaadavatele andmetele ning erinevates süsteemides ja riikides kasutatavatele tüüpilisematele suurustele [3; 20–21; 78]. Kontaktliini mudeli koostamisel on lähtutud tabelis 5.6 loetletud juhtidest ja nende nimiandmetest. Juhtide iseloomulikud parameetrid (D , r , R_i) on valitud tootja kataloogidest [79; 80] vastavalt juhtmete margile.

Tabel 5.6.
Kontaktvõrgu juhtide
nimiandmed

Juht	Tähis	Mark	D (m)	r (m)	R_i (Ω /km)	h (m)
Fiider	F	ACSR 305	0,0241	0,01205	0,0949	7,65
Kontaktliin	OC	Cu-ETP 150	0,0148	0,0074	0,17	6,26
Kandejuhe	K	HK 120	0,0141	0,00705	0,153	7,41
Maandus	G	HK 95	0,0125	0,00625	0,193	-1,00
Tagasisivool	T	ACSR 152	0,0173	0,00865	0,19	6,26
Relss	R1	teras	0,146	0,073	0,024	0,96
Relss	R2	teras	0,146	0,073	0,024	0,96

Lisaks juba eelnevalt mainitud juhtide paljususele teeb kontaktliini modelleerimise veelgi keerukamaks nende endi vahel ning juhi ja maa vahel esinev induktiivne ja mahtuvuslik sidestus. Kontaktvõrgusüsteemi juhid omavad lisaks enda induktiivsusele X_i ja mahtuvusjuhtivusele (maa suhtes) C_i ka juhtide vahel esinevat induktiivsust X_m ja mahtuvusjuhtivust C_m .

Kontaktliini takistuse arvutamisel on rakendatud Carson'i meetodit, mis arvestab homogeenses väljas maapinna tagastusefekti. See meetod on maailmas levinuim raudtee kontaktliinide takistuse leidmisel [52; 78; 81]. Carson'i meetod käsitleb laine levikut maapinnaga paralleelselt asetsevates liinides, arvestades naaberliinide induktiivset ja mahtuvuslikku mõju [82] ja juhtide geomeetrilist paiknemist liinil.

Carson'i meetodist tulenevalt avalduvad kontaktliini takistused juhi enda takistusena ehk takistusena maapinna suhtes ja kahe juhi omavahelise takistusena. Juhi enda takistus sisaldab kolme komponenti (avaldis 5.1): kinnise voolukontuuri induktiivsust X_i (eeldusel, et juht ja maa on ideaalsed juhid), juhi sisemist takistust Z_c ning maapinna takistust Z_g [78].

$$Z_{ii} = jX_i + Z_c + Z_g \quad (5.1)$$

Maapinnaga paralleelselt asetseva ja teatud kõrgusel paikneva kahe voolujuhi vastastikune takistus sisaldab endas kahte komponenti (avaldis 5.2): kahe juhi vahelist vastastikust induktiivsust X_m (eeldusel, et juhid ja maapind on ideaalsed) ja maapinna takistust Z_g , mis kõnealusel juhul on ühine mõlemale juhile [78].

$$Z_{ij} = jX_m + Z_g \quad (5.2)$$

Avaldises (5.1) esinev juhi sisemine takistus Z_c koosneb juhi alalisvoolutakistusest R_i , mis on leitav tootja kataloogidest ja pinnaefektist. Arvutuste käigus ei ole viimasele tähelepanu pööratud, kuna 50 Hz põhisagedusega liinide arvutustes on õigustatud pinnaefekti arvestamata jätmine [81]. Seega koosneb selles kontaktliini mudelis juhi sisemine takistus Z_c ainult tema alalisvoolutakistusest R_i .

Carson'i arvutusmeetodit rakendades on kontaktliinijuhi enda takistus Z_{ii} kilomeetri kohta leitav avaldisega (5.3) ning juhi i ja j vaheline takistus Z_{ij} avaldisega (5.4).

$$Z_{ii} = j \frac{\omega\mu_0}{4\pi} \cdot \ln \frac{2h_i}{r_i} + R_i + (\Delta R + \Delta X) \quad (5.3)$$

$$Z_{ij} = j \frac{\omega\mu_0}{4\pi} \cdot \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} + 2(\Delta R + \Delta X) \quad (5.4)$$

Avaldistes 5.3 ja 5.4 on:

ω – nurksagedus rad/s;
 μ_0 – magnetiline konstant H/km;
 h_i – juhi i kaugus maapinnast m;
 r_i – juhi i raadius m;
 D_{ij} – juhi i ja j vaheline kaugus m;
 d_{ij} – juhi i kaugus juhi j peegeldusse m;
 R_i – juhi alalisvoolutakistus Ω /km;
 $\Delta R, \Delta X$ – Carson'i parendustegurid.

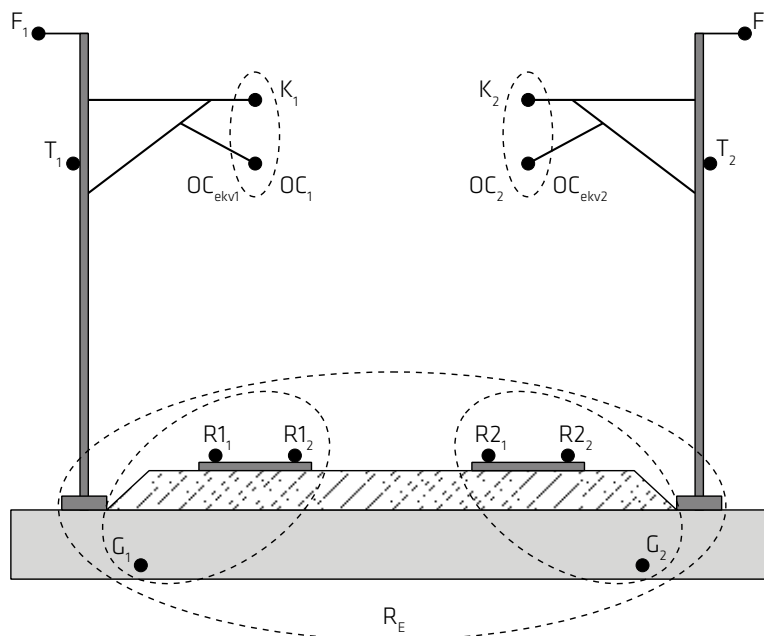
Nii nagu takistus, arvutatakse modelleerimiseks ka mahtuvusjuhtivus. Juhi ja maa vaheline mahtuvusjuhtivus C_i kilomeetri kohta on leitav avaldisega (5.5) ning juhtide omavaheline mahtuvusjuhtivus C_m kilomeetri kohta avaldisega (5.6).

$$C_i = j \frac{1}{\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2h_i}{r_i}} \quad (5.5)$$

$$C_m = j \frac{1}{\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}}} \quad (5.6)$$

Kontaktliinis on omavahel elektriliselt ühendatud kontaktliini- (OC) ja kandejuhe (K) ning relsipaarid (R1, R2) ja maandusjuht (G). Kuna need juhid on paralleelselt kogu raudteeliini ulatuses omavahel ühendatud, siis võib neid modelleerimise lihtsustamiseks grupeerida (joonis 5.12). Sellest tulenevalt on koostatud lihtsustatud ekvivalentne mudel kontakt- ja kandejuhtmele ning rööppaaridele ja maandusjuhtmele. Elektrilises ühenduses olevate juhtide grupeerimise tulemusena koosneb kontaktliini mudel kahest kontaktliinijuhist OC_{ekv1} ja OC_{ekv2} , kahest tagasivoolujuhist T_1 ja T_2 , kahest fiidriinist F_1 ja F_2 ning kogu raudteeliinile ühisest maandusjuhust R_E .

Joonis 5.12.
Elektriliselt ühendatud juhtide grupeerimine kontaktliinis



Juhi i ja j ekvivalent läbi induktiivjuhtivuse on saadud, rakendades avaldist (5.7)

$$X_{ekv} = \frac{X_i \cdot X_j - X_m^2}{X_i + X_j - 2X_m} \quad (5.7)$$

kus X_i – juhi i enda induktiivsus;
 X_j – juhi j enda induktiivsus;
 X_m – juhi i ja j vaheline induktiivsus.

Mahtuvusjuhtivuse arvutamisel on arvestatud, et eelnevalt leitud ekvivalentne juht R_E on mudelis iseloomult võrdväärne maapinnaga, kuna R_E sisaldab endas maaühenduses olevaid sama potentsiaaliga juhte. Sellest tulenevalt on mudelis juhi R_E vahelise mahtuvusjuhtivuse väärtuse saamiseks teiste juhtidega (F , T ja OC_{ekv}) rakendatud avaldist (5.5). Juhil OC_{ekv} puhul on omavahelise mahtuvusjuhtivuse leidmisel mahtuvusjuhtivuse väärtus võetud arvesse kahekordsena, kuna tegelikkuses sisaldab ekvivalentne juht endas kahte eraldi paiknevat juhti.

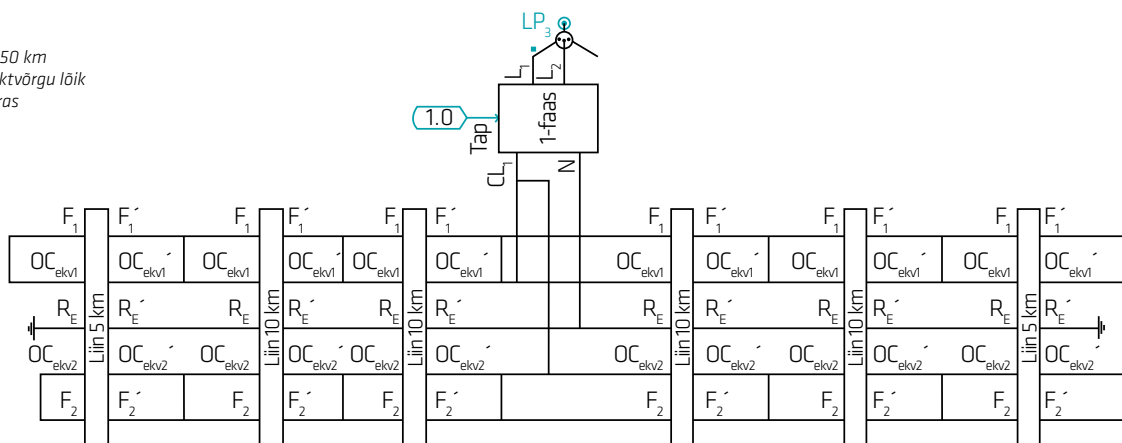
Lähtudes eelnevalt kirjeldatud arvutuskäigust, on kontaktvõrgu modelleerimiseks *PSCAD* tarkvaras koostatud kontaktliini juhtidest ja nende vahelistest ühendustest koosnev mudel, mis sisaldab kõiki juhte koos nende aktiivtakistuse (R), induktiivjuhtivuse (X_r , X_m) ja mahtuvusjuhtivuse (C_m) parameetritega. 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 nävtakistuseks Z .

Kontaktvõrgu mudel on koostatud moodulitena, milleks on 5 km ja 10 km pikkused liinilõigud, mis võimaldab sobiva pikkusega kontaktvõrgusüsteemi koostamist, ühendades jadamisi omavahel vajaliku pikkusega moodulid. Alamoodulite liinijuhtide komponentide parameetrid (takistus, induktiiv- ja mahtuvusjuhtivus) on mudelisse kantud vastavalt nende väärtusele kas 5 km või 10 km kohta.

Rail Baltico kõige optimaalsema trassi kogupikkuseks Eesti lõigul on 229 km. Võttes arvesse võimalikke muudatusi trassi valikul, peatuste asukohtades ja ümberlaadimisjaamade tarbeks ehitatavaid täiendavaid raudteelõike, on käesoleva analüüsi tarbeks modelleeritud elektriraudtee kontaktvõrgu kogupikkusega 250 km. Kontaktvõrgu modelleerimisel on lähtutud kesktoitega süsteemi põhimõttest, mille puhul on iga 50 km kontaktliini keskpunkti ühendatud toitepunkt veoalajaama trafoga. Iga 50 km pikkune kontaktvõrk on omaette üksus ning need pole normaalolukorras omavahel ühendatud, kuna eri seksioonide kokkuühendamine tekitaks täiendavaid pingelangusid. 50 km pikkuse kontaktliini mudelit kujutab joonis 5.13.

Detailsema ülevaate kontaktliinide parameetrite arvutusmeetodite ja modelleerimismudeli koostamisest annab [46].

Joonis 5.13.
Modelleeritud 50 km
pikkune kontaktvõrgu lõik
PSCAD tarkvaras



5.2. SIMULATSIOONISTSENAARIUMID

Elektriraudtee ülekandevõrgu ühendamisel kaasnevad muutused ka viimase talitusparameetrites. Lisaks elektrivõrgu täiendavale koormusele tuleb silmas pidada elektriraudteele iseloomulikke talitusrežiime nii normaal- kui ka rikkeolukorras. Elektriraudtee liitumisega kaasnevate mõjude analüüsimiseks modelleeritakse erinevaid talitusstenaariume.

5.2.1. Elektriliinide ülekandevõimsus

Veendumaks elektriraudteele vajaliku ülekandevõimsuse tagatuseks, on tarvis hinnata potentsiaalsete liitumisalajaamade ülekandeliinide koormatust ja nende võimsusedastuse võimekust. Ülekandeliinide koormuse piirmääraks normaalskeemi juures on 80% ning N-1 tingimustel 92%.

Tehnilise analüüsi tegemisel on lähtutud ülekandevõrgu prognoositud koormusest aastateks 2020 ja 2030. 2030. aasta prognooside analüüsimisel on arvesse võetud ka uusi planeeritavaid ülekandeliine.

Lähtudes juba eespool kirjeldatust, on elektriraudtee koormuseks liitumisalajaama toitepiirkonnas arvestatud 25 MVA. Sellest piisab toitepiirkonnas samal ajal liikuvale kahele kaubarongile ja ühele reisirongile.

5.2.2. Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitlus

Erinevalt tavapärasest elektrivõrgust võtab kontaktvõrgus aset leidva lühisekoha leidmine ja lühise väljalülitamine rohkem aega, kuna elektriraudteesüsteemis on erinevaid toitesektsioone ja ümberlülitusi palju. Seega osutub ülekandevõrgu kontekstis vajalikuks analüüsida elektriraudtee kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse mõjusid, kus lühise kestvuseks on määratud üks sekund. Elektriseadmed on nimiaandmetes sertifitseeritud lühisele kestvusega üks sekund, mistõttu on see maksimaalseks lubatud lühise kestvuseks elektrivõrgus.

Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse analüüsi läbiviimisel ja sellega kaasnevate mõjude hindamisel on lähtutud ülekandevõrgu normaalskeemist. Elektriraudtee potentsiaalsete liitumisalajaamade hulgast (tabel 5.1) on lähema vaatluse alla valitud ülekandevõrgu põhjaosas Bus 4 alajaam ning lõunaosas Bus 21 ja Bus 33 alajaam. Täiendavalt on analüüs tehtud ka Bus 35 alajaamale (samuti ülekandevõrgu lõunaosas). Bus 4 alajaama eraldi väljatoomine on oluline, kuna viimase lattidele on ühendatud generaatorid. Seega asub kontaktvõrgu lühis elektriraudtee liitumispunktiga Bus 4 alajaamas generaatoritele elektriliselt kõige lähemal ning avalduv mõju viimaste talitlusele on kõige tugevam. Bus 35 alajaam on täiendavalt analüüsi kaasatud, kuna tegemist on *Rail Balticu* trassi kõige lõunapoolsema alajaamaga. Ühtlasi on tegemist tabelis 5.1 toodud alajaamadest elektriliselt kõige nõrgemaga, mistõttu on eeldatud, et elektriraudtee talitlusest tingitud mõjud avalduvad selle liitumisalajaama korral kõige selgemini.

Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse simulatsioonide läbiviimisel on tähelepanu pööratud eelkõige ühefaasilise jõutrafo elektriraudtee koormuse võrku ühendamisele, kuid täiendavalt on simulatsioonid ja analüüs tehtud ka *Scott*-trafoühenduse rakendamiseks.

Lühise asukohana kontaktliinis vaadeldakse kahte võimalikku varianti. Esimesel juhul vaadeldakse lühise asukohta kontaktliini lõpus, kus lühis asub veoalajaamast 25 km kaugusel. Seega on lühise koht raudtee- ja ülekandevõrgu ühenduskohast kaugeimas võimalikus punktis. Teisel juhul vaadeldakse lühise kontaktliini alguses, veoalajaama vahetus läheduses ehk viimase lattidel. Kontaktvõrgu lõpus toimuva lühise põhjustatud mõjud sumbuvad juba kontaktvõrgus, mistõttu eeldatakse võrdlemisi väikest mõjude avaldumist ülekandevõrgule. Veoalajaam on aga ülekandevõrgule lähim punkt ja veoalajaama vahetus läheduses toimuva lühise mõjud kanduvad ülekandevõrku, mistõttu on tegemist ülekandevõrgule keerulisema olukorraga ning eeldatavalt on mõjud suurimad.

Generaatorid on ülekandevõrgu põhjaosas ühendatud Bus 4 alajaama lattidele, kus neile avalduv mõju on eeldatavasti suurim, tulenevalt elektriliselt lähimast asukohast kontaktvõrgu lühisele. Elektriraudtee liitumispunkti korral Bus 4 alajaamas on täiendavalt käsitletud halvimat võimalikku lühise stsenaariumi, mille puhul kontaktvõrgu alguses leiab aset kaks järjestikust ühe sekundilise kestusega lühist (lühistevaheliseks ajaks on määratud kolm sekundit).

Lühise katsete eesmärgiks on vaadelda kontaktvõrgus aset leidva lühise mõju ülekandevõrgule. Vaadeldakse pinge muutuste teket elektriraudtee koormuse liitumispunktis ja selle mõju ulatust liitumispunkti kaugemale, ülekandevõrgu teistesse alajaamadesse. Lisaks ülekandevõrgu alajaamadele on oluline välja selgitada, kas võimalikud kontaktvõrgus aset leidvad lühised avaldavad mõju ka ülekandevõrgus paiknevalele generaatoritele.

Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse analüüs annab olulist informatsiooni elektriraudteesüsteemi talitluse mõjudest ülekandevõrgule, kuna lühisega kaasnev pingelohk toob selgelt välja probleemsed liitumisalajaamad ja võimalikud kitsaskohad ülekandesüsteemis.

5.2.3. Vedurite regeneratiivne pidurdamine

Regeneratiivse pidurdussüsteemi rakendamisel talitleb veduri mootor generaatorina ning võimaldab vabaneva energia kontaktvõrku suunata. Lisanduva energiaga kaasneb kontaktvõrgus pinge väärtuse tõus, mistõttu on tarvis hinnata sellega kaasnevaid võimalikke mõjusid ülekandevõrgule.

Vedurite regeneratiivsest pidurdamisest tingitud mõjude analüüsimisel on elektriraudtee liitumispunktidenähtude alla võetud ülekandevõrgu põhjaosas Bus 4 alajaam ning lõunaosas Bus 21 alajaam. Ülekandevõrgu generaatorid on ühendatud Bus 4 alajaama lattidele, mistõttu on generaatoritele avalduvat mõju kõige selgemini võimalik määrata just selle liitumisalajaama korral. Bus 21 alajaam jääb *Rail Baltic* trassi Raplamaa piirkonda ja on seal sobivaimaks elektriraudtee liitumisalajaamaks [70]. Alajaam on ühtlasi nii elektriliste näitajate (tabel 5.1) kui ka eespool kirjeldatud kontaktvõrgu lühisetalitluse analüüsi [70] põhjal enam mõjutatav kui ülekandevõrgu lõunaosas vaadeldud Bus 33 alajaam.

Elektriraudtee koormuse ülekandevõrku ühendamist on vaadeldud ühefaasilise jõutrafo rakendamise põhjal. Kontaktvõrgus toimuvate muutuste korral on jõutrafo rakendamisel ülekandevõrgule avalduvad mõjud suuremad kui *Scott*-trafo puhul. See asjaolu tuleneb kahe trafoühenduse erinevusest, nimelt on *Scott*-trafoühendusel elektriraudtee koormus jaotatud ülekandevõrgu kõigi kolme faasi vahel, aga jõutrafo rakendamisel on elektriraudtee koormus ühendatud ülekandevõrgu kahe faasi vahele.

Tehnilise analüüsi läbiviimisel on vedurite regeneratiivset pidurdust modelleeritud konstantse näivvõimsuse režiimis *Con S* (peatükk 5.1.2.2). Viimane omab süsteemi pingele suuremat mõju, tulenevalt selles režiimis kaasnevate suuremate muutustega veduri reaktiivvõimsuses.

Regeneratiivse pidurduse modelleerimisel on vaatluse alla võetud ülekandevõrgu seisukohast kõige keerulisem olukord, kus oodatav mõju on suurim ja selgemini märgatav. Regeneratiivsel pidurdusel vabaneva ja kontaktvõrku suunatud energia tarbivad enamasti teised samal ajal samas toitesektsioonis paiknevad rongid. Juhul, kui vabanev energiahulk on piisavalt väike ja see kulub täielikult teiste kontaktvõrgus paiknevate koormuste toiteks, siis ülekandevõrgule regeneratiivsest pidurdamisest mõjusid oodata ei ole. Olukorras, kus pidurdamisest vabanev energiahulk on suurem kui tarbimine, tõuseb kontaktvõrgu pinged sedavõrd, et on oodata mõjude kandumist ka ülekandevõrku. Sellest tulenevalt on vedurite regeneratiivset pidurdust modelleeritud olukorras, kus kontaktvõrgu koormus on väiksem ja regeneratiivset pidurdusenergia suurim. Arvutusmudelil on kontaktvõrku ühendatud kaks regeneratiivset vedurit, kumbki võimsusega 5 MW, ning kogu ülejäänud rongi koormus on jäetud arvestamata. Niisuguses situatsioonis on pidurdusel vabanev energia suurim ning puuduvad selle tarbijad.

Eesmärgiks on analüüsida elektriraudtee veduri regeneratiivsest pidurdamisest tingitud pingemuutusi ülekandevõrgu liitumispunktides. Lisaks alajaamade võimalike latipingete muutustele on oluline hinnata regeneratiivse pidurdamise mõjusid ka võrgus paiknevatele generaatoritele.

5.2.4. Pingesümmeetria

Elektriraudtee koormuse eripärast tulenevalt kaasneb selle ülekandevõrku ühendamisel kolmeefaasilises süsteemis pingesümmeetria, mis mõjutab nii süsteemis töötavaid generaatoreid kui ka teisi tarbijaid. Asümmeetriateguri piirmääraks individuaalsele alajaama toitele liituvale koormusele on seatud 1%. Elektrivõrgu üldises plaanides järgitakse 110 kV mõõtepunktis 2% piirmäärat.

Elektriraudtee koormuse ülekandevõrku ühendamise kaasneva pingesümmeetria analüüsimisel on lähemalt vaatluse alla võetud ülekandevõrgu põhjaosas Bus 4 alajaam, kus valiku kriteeriumiks on alajaama lattidele ühendatud generaatorid. Generaatorite osas on tegemist kõige keerulisema juhtumiga, kuna elektriraudtee koormus ja generaatoritevaheline takistus on väiksem. Lisaks liitumispunktile Bus 4 alajaamas on täiendavalt pingesümmeetria mõjusid analüüsitud ka põhjaosa alternatiivsetele liitumispunktidele Bus 2 ja Bus 7 alajaamas. Ülekandevõrgu lõunaosas on simulatsioonide läbiviimisel liitumispunkti alajaamadeks valitud, nagu eespoolgi kirjeldatud, kontaktvõrgu lühisetalitlusele Bus 21, Bus 33 ja Bus 35 alajaamad. Täiendavalt on analüüsi kaasatud lõunaosa Bus 32 alajaam, hindamaks viimase lattidele ühendatud generaatorile avalduvaid mõjusid kõige raskemas situatsioonis.

Pingesümmeetria leviku hindamisel on läbi viidud simulatsioonides elektriraudtee koormuse liitumistrafodena käsitletud ühefaasilist jõutrafo ning asümmeetriliselt koormatud *Scott*-trafo. Sellise valiku tegemisel on lähtutud maksimaalsest pingesümmeetriast [46; 70]. *Scott*-trafo ühendust on analüüsitud vaid elektriraudtee asümmeetrilise koormuse puhul, kuna sümmeetrilise koormuse puhul on ülekandevõrgus tekkiv pingesümmeetria minimaalne [46].

Elektriraudtee koormuseks on läbiviidud simulatsioonides valitud 24 MVA (20 MW), mis vastab nelja koostatud veduri mudelile.

Iga valitud liitumisalajaama korral on simulatsiooni tulemustele tuginedes analüüsitud liitumispunkti alajaamas pingesümmeetria tekkimise taset ja selle edasikandumist teistesse ülekandevõrgu sõlmalajaamadesse. Olulisel kohal on pingesümmeetria mõjude hindamine ülekandevõrku ühendatud generaatoritele.

5.2.5. Toitepiirkondadeüleline liikumine

Elektriraudtee koormuse siirdumisega ühelt liitumispunkti toitepiirkonnalt teisele kaasnevad pingeväärtuse kõikumised vastavalt veokoormuse sisenemisele või lahkumisele toitepiirkonnast.

Koormuse siirdumisega ülekandevõrgule kaasnevate võimalike mõjude hindamiseks on eelkõige tähelepanu pööratud ülekandevõrgu lõunaosale, tulenevalt selle võrguosa potentsiaalsete elektriraudtee liitumisalajaamade elektrilistest parameetritest (tabel 5.1) ning tuginedes eespool kirjeldatud analüüside tulemustele [70]. Toitepiirkondadeüleline liikumise analüüsimisel on vaatluse alla võetud Raplamaa piirkonna Bus 21 ja Pärnumaa piirkonna Bus 33 alajaama vaheline veokoormuse liikumine. Simulatsioonistenaariumides on vaadeldud nii koormuse siirdumist Bus 21 alajaama toltelt Bus 33 alajaama toitele kui ka vastupidist situatsiooni. Konkreetsete alajaamade valik tuleneb nende kuulumisest lõunaosa ülekandevõrgu pikkadesse toiteringidesse, kus alajaamade vahemaad on võrdlemisi pikad ja neid ühendav elektrivõrk hõre. Neist asjaoludest tulenevalt on valitud liitumispunktide korral oodata selgemini eristuvaid tulemusi, mis loovad eeldused järeltulete tegemiseks.

Elektriraudtee koormuse ülekandevõrku ühendamise trafo tüübist tulenevate erinevuste analüüsimiseks on simulatsioonid tehtud nii jõu- kui *Scott*-trafoga.

Simulatsioonide läbiviimisel vaadeldi koormuse siirdumisest tingitud pingeväärtuse muutusi liitumisalajaamades ning võimalike muutuste edasikandumist ülekandevõrgu teistesse sõlmalajaamadesse. Lisaks alajaamadele hinnati elektriraudtee koormuse toitepiirkondadeüleline liikumisega kaasnevaid mõjusid ka Pärnumaa piirkonna Bus 32 alajaama ühendatud generaatori talitlusele.

5.3. TULEMUSED JA TÄHELEPANEKUD

5.3.1. Elektriliinide ülekandevõimsuse hinnang

Elektriliinide ülekandevõimsuste analüüsimisel ning elektriraudtee koormuse lisandumise võimalikkuse hindamiseks on vaadeldud liinide koormusi enne ja pärast elektriraudtee koormuse võrku lisandumist. Alajaamade ülekandeliinide koormused on kajastatud protsendina nende maksimaalsest ülekandevõimsusest. Eraldi on hinnatud *Rail Balticu* trassil kõigi kolme, Harjumaa, Raplamaa ja Pärnumaa piirkondade ülekandeliine.

Analüüsi tulemustest selgub, et kõigi piirkondade ülekandeliinid on normaaltalitusel keskmiselt koormatud, omades märkimisväärset reservvõimsust nii 2020. aasta kui ka 2030. aasta prognooside kohaselt. Viimasel juhul on õhuliinide koormuste kasvaks baastingimustel 2–6%, võrreldes 2020. aasta prognoosiga.

2020. aasta prognoosi kohaselt on Harjumaa piirkonnas kõige enam koormatud liinid alajaamade Bus 7 ja Bus 10 vahel ning Bus 6 ja Bus 7 vahel, kus liinide koormatus jääb vahemikku 30...35% maksimaalsest lubatud väärtusest. Elektriraudtee koormuse lisandumisega ei kaasne märkimisväärset koormuste kasvu. Harjumaa piirkonna potentsiaalsete liitumisalajaamade (tabel 5.1) juures jääb veokoormuse lisandumisega kaasnev ülekandeliinide koormatuse tõus keskmiselt alla 5%. Suurimaks on koormatuse tõus 12% alajaamade Bus 6 ja Bus 7 vahelisel liinil elektriraudtee liitumisel alajaamas Bus 6.

Nii nagu Harjumaa piirkonnas, on ka Raplamaa ülekandeliinid normaaltalitusel keskmiselt koormatud ning elektriraudtee koormuse lisandumine probleeme ei põhjusta. Selles piirkonnas on kõige enam mõjutatavateks alajaamade Bus 20 ja Bus 21 ning Bus 19 ja Bus 20 vahelised liinid, kus elektriraudteel koormuse lisandumisel kaasneb koormatuse tõus liinides vastavalt 21% ja 22%. Saadud tulemustest [46] selgub, et Raplamaa piirkonna ülekandeliinid on märgatavalt enam liituvast elektriraudtee koormusest mõjutatud, kui seda on Harjumaa piirkonna liinid, sellest hoolimata on ülekandeliinidel piisav ülekandevõimsuse reserv.

Pärnumaa piirkonnas avaldab elektriraudtee lisandumine suurimat mõju alajaamade Bus 33 ja Bus 32, Bus 32 ja Bus 31, Bus 30 ja Bus 31 ning Bus 33 ja Bus 31 vahelistel liinidel, kus kõige enam koormub liin alajaamade Bus 32 ja Bus 31 vahel, saavutades maksimaalseks koormatuseks 38%. Tulemustest selgub, et samuti kui eelnevates piirkondades, on ka Pärnumaa ülekandeliinid normaaltalitusel keskmiselt koormatud ja elektriraudtee koormuse lisandumine liinide ülekandevõimsuse seisukohast probleeme ei valmista.

2030. aasta koormuse prognoosi tulemus on ligikaudu sama kui 2020. aasta prognoosi tulemus ja suuri erinevusi ülekandeliinide protsentuaalses koormatuses elektriraudtee ülekandevõrku ühendamisel ei esine.

Detailsem ülevaade elektriraudteel koormuse lisandumisega kaasnevatest muutustest liitumisalajaamade ülekandeliinide koormatuses on esitatud allikas [46].

5.3.2. Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse mõju

Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse analüüsi käigus vaadeldi liitumispunkti alajaamade latipingeid ja lühisest tingitud muutuste edasikandumist ülekandevõrgu teistesse alajaamadesse. Lisaks muutustele alajaamades analüüsiti lühisest põhjustatud muutusi ka ülekandevõrgu põhjaosa alajaama Bus 4 ja ülekandevõrgu lõunaosa alajaama Bus 32 lattidele ühendatud generaatoritele.

Läbiviidud simulatsiooni tulemused kinnitasid, et lühise mõjud on suurimad olukorras, kus see leiab aset ülekandevõrgule lähimas punktis ehk veoalajaama vahetus läheduses.

Kõikidest analüüsitud liitumisalajaamadest ilmnes suurim kontaktvõrgu lühisest põhjustatud pingelohk alajaamas Bus 35, kus selle väärtuseks oli raskeima lühise situatsiooni juures 14,28 kV. Sellele järgnes alajaama Bus 21 maksimaalne pingelohu väärtus 11,51 kV. Lühisega kaasneva pingelohu väärtus on otsest sõltuvuses alajaamade elektrilise tugevusega ehk nende lühisvõimsuste väärtustega. Kõige suurema lühisvõimsusega vaadeldud alajaamadest on põhjaosa alajaam Bus 4 (2280 MVA), kus ilmnesid ka erinevates lühiseolukordades teistest liitumisalajaamadest väiksemad pingelohu väärtused. Alajaamas Bus 4 oli simulatsioonitulemustes saadud suurimaks pingelohuks 5,13 kV.

Lühisest tingitud pinge väärtuse alanemine põhjustab vastavalt pinge languse ulatusele alajaamade faasipingetes asümmeetriat. Kontaktvõrgu lõpus toimuva lühise korral on kõigi vaadeldud alajaamade puhul tekkiv pingelohk võrdlemisi väikene ja ei too endaga üheski alajaamas kaasa faasipingete asümmeetria suurenemist. Lühisekoha nihkumisega liitumispunkti alajaamale lähemale kaasnevad teatavad mõjud alajaamade faasipingetele. Liitumispunktil alajaamas Bus 4 ilmnes selle faasipingetes vaevu märgatav asümmeetria, mis teataval määral kandus edasi alajaama Bus 5. Sarnaselt suurimale pingelohu väärtusele oli suurimat asümmeetriat märgata alajaamas Bus 32, kust see edasi kandus võrdlemisi kaugemale Raplamaa piirile jääva Bus 22 alajaamani. Ka liitumispunktil Bus 21 alajaamas oli simulatsioonitulemustes märgata faasipingete asümmeetria kasvumist veoalajaama vahetus läheduses toimuva lühise ajal ning sõltuvalt pingelohu väärtusele oli asümmeetria kandumist märgata kuni alajaamadeni Bus 16 ja Bus 26. Elektriraudtee liitumispunktil alajaamas Bus 33 oli selle faasipingete asümmeetria edasikandumist märgata kuni alajaamadeni Bus 30 ja vähesel määral ka Bus 16.

Võrreldes simulatsioonitulemustes saadud pingelohkude väärtusi kahe erineva lühise asukoha korral ning nende keskmist muutust ülekandevõrgu alajaamades, selgus, et mida pikemad on ülekandevõrgu alajaamade vahemaad, seda suurem pingelohu väärtuse sumbumine liitumispunkti ja ülekandevõrgu alajaamade vahel aset leiab, mistõttu on ka tundlikkus lühise asukohale mõnevõrra väiksem. Seega on pingelohu väärtustes tekkiv erinevus, lühise korral kontaktvõrgu lõpus ja selle alguses, väiksem. Lühise nihkumisel kontaktvõrgu lõpust selle algusesse suurenes keskmine ülekandevõrgu alajaamade pingelohk liitumispunktil Bus 4 alajaamas ligikaudu 12 korda. Bus 21, Bus 33 ja Bus 35 alajaamades suurenes see vastavalt ligi 8, 10 ja 6 korda.

Simulatsiooni tulemustest selgus, et lühise möödumisel taastusid kõigil juhtudel alajaamade latipinged oma esialgse väärtuseni ja püsivaid muutusi kontaktvõrgu lühisega alajaamade talitluses ei ilmnenud.

Kõikide analüüsitud liitumispunktide korral vaadeldi lühise mõjusid ka ülekandevõrku ühendatud generaatoritele. Simulatsiooni tulemuste põhjal saab kokkuvõtvalt väita, et kontaktvõrgu lühised ei põhjusta häiringuid vaadeldud generaatorite talitlusele. Generaatorite pinge, väljundvõimsuste ja pöörlemiskiiruse väärtuses märgatavaid muutusi ei ilmnenud. Generaatorite osas viidi läbi ka kahe järjestikuse lühise katse, kuna tegemist on pöörlevate seadmetega, millel inertsisist tingituna võtab häiringu möödumisel esialgse olukorra taastumine mõnda aega. Kahe järjestikuse lühise korral võib tekkida olukord, kus

esimese lühise põhjustatud häiringute võimalik mittestabiliseerumine võib uue lühise ilmnemisel kaasa tuua häiringute võimendumise. Generaatori talitusparameetrite analüüsimisel selgus, et kahe järjestikuse lühise olukord ei erine ühe lühisega olukorrast. Generaatorite töö stabiliseerub lühiste lõppemisel ning püsivaid häiringuid generaatorite talitluses ei ilmne. Generaatorid saavutavad lühise möödumisel oma väljundparameetrite esialgsed väärtused ligikaudu kolme sekundiga.

Analüüsi käigus vaadeldi ka kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse mõjusid elektriraudtee koormuse ühendamisel läbi *Scott*-trafo, hindamaks mõjude võimalikke erinevusi *Scott*- ja jõutrafo rakendamisel. Lühise katses käsitleti olukorda, kus ühe sekundine lühis leiab aset veoalajaama vahetus läheduses. *Scott*-trafo rakendamisest tulenevate mõjude hindamiseks vaadeldi liitumispunktidenä kolme kõige tõenäolisemat liitumispunkti *Rail Balticu* trassil, milleks ülekandevõrgu põhjaosas on alajaam Bus 4 ning lõunaosas alajaamad Bus 21 ja Bus 33. Kõik kolm alajaama ja nendega ühendatud elektrivõrk on võrdlemisi erinev. Alajaam Bus 4 on elektriliselt kõige tugevam, elektrivõrk on tihe ja toiteringid väikesed. Alajaam Bus 21 on kolmest nõrgim ning lisaks on toiteringid võrdlemisi pikad, kuna selles piirkonnas paiknevad alajaamad hõredalt. Alajaam Bus 33 on kahe eelneva vahepealne, seda nii elektrilise tugevuse poolest kui ka elektrivõrgu tiheduselt ja toiteringidelt. Kontaktvõrgu lühise simulatsioonitulemustest selgus, et alajaamas Bus 4 parandab *Scott*-trafo rakendamine oluliselt ülekandevõrgule avalduvaid mõjusid. Liitumispunkti Bus 4 alajaama faasidevahelises pinges tekkiv pingelohk vähenes enam kui poole võrra ning teistes ülekandevõrgu alajaamades vähenes see ligikaudu veerandi võrra, võrreldes jõutrafo rakendamisel saadud tulemustega. Liitumispunktidel Bus 21 ja Bus 33 alajaamades vähenes aga nii liitumispunktides kui ka teistes ülekandevõrgu alajaamades faasidevahelises pinges tekkiv pingelohk võrdselt veerandi võrra. Liitumispunktidele avalduva mõju ulatus on selgitatav alajaamade elektrilise tugevusega, kus lühisvõimsus alajaamas Bus 4 on 2280 MVA ning alajaamades Bus 21 ja Bus 33 vastavalt 940 MVA ning 1062 MVA. Seega *Scott*-trafo rakendamine vähendab märgatavalt kontaktvõrgu lühisel ülekandevõrgu alajaamade faasidevahelises pinges avalduva pingelohu väärtust ja mida tugevama alajaamaga on tegemist, seda parem on *Scott*-trafo rakendamisel saadav tulemus.

Scott-trafo rakendamisel on aga ülekandevõrgu faasipingete koormatus jõutrafofost erinev. Nimelt moodustub elektriraudtee koormuse ülekandevõrku ühendamisel läbi *Scott*-trafo kolmefaasiline ühendus, seega on lühise olukorras pinge alanemine ülekandevõrgus tunda kõigis kolmes faasis vastavalt nende koormatusele. Samas ühendatakse jõutrafo korral koormus ülekandevõrgu kahe faasi vahele ning kontaktvõrgu lühisel ei ilmne pinge alanemist kolmest faasist ühes. Simulatsiooni tulemustest selgus, et kontaktvõrgu lühisega kaasnev märgatav pinge alanemine toob kaasa faasipingete asümmeetria suurenemise, mis vastavalt pinge alanemise väärtusele kandub liitumispunkti alajaamast edasi ka teistesse ülekandevõrgu punktidesse. Lühisega kaasneva faasipingete asümmeetria leviku ulatuses ülekandevõrgu kaugematesse sõlmpunktidesse kahe trafoühenduse simulatsioonitulemustes erinevusi ei täheldatud.

Kui vaadelda kontaktvõrgu lühisest tulenevaid mõjusid ülekandevõrgus paiknevatele generaatoritele, siis konkreetseid järeldusi *Scott*-trafo rakendamise võimalikest mõjudest teha ei saa, kuna generaatoritele avalduv mõju oli minimaalne ning kahe trafoühenduse rakendamisel märkimisväärsed erinevusi tulemustes ei ilmnenud.

Põhjalikum ülevaade kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitlusega kaasnevatest mõjudest ülekandevõrgus on toodud allikas [70].

Kokkuvõtvalt võib öelda, et kõigist vaadeldud tõenäolistest liitumispunkti alajaamadest on tugevaim põhjaosa alajaam Bus 4, kus kontaktvõrgu lühisest tingitud mõjud on kõige väiksemad ning liitumispunktis *Scott*-trafo rakendamine parandab saadud tulemusi omakorda enam kui poole võrra. Kontaktvõrgu lühised on kõige enam tunda liitumispunkti Bus 21 alajaamas. Alajaam Bus 33 jääb saadud tulemustega kahe eelneva vahepeale. *Scott*-trafo eelistamine jõutrafole elektriraudtee koormuse ülekandevõrku ühendamisel vähendab ülekandevõrgule avalduvaid mõjusid valdavalt veerandi võrra.

5.3.3. Vedurite regeneratiivsest pidurdamisest tingitud mõju

Ajamiga pidurdamisel ehk regeneratiivsel pidurdamisel kasutatakse mootori pöörlemistakistust ratastega pidurdamiseks. Sellel pidurdusrežiimil töötab veduri mootor aga generaatorina, kus pöördejõu allikaks on rongi inertsjõud. Vastavalt rongide tehnilistele lahendustele on regeneratiivset pidurdusenergiat võimalik süsteemi tagastada. Enim levinud on pidurdusenergia rakendamine rongisiseseks tarbimiseks, kuid võimalik on ka vabaneva energia edastamine raudteesüsteemi toitevõrku. Pidurdusenergia

elektrivõrku suunamisel tuleb silmas pidada kontaktvõrgus kaasnevat pingetõusu ning selle edasikandumist ülekandevõrku.

Elektriraudtee koormuse liitumispunktina on ülekandevõrgu põhjaosas analüüsitud alajaama Bus 4, mis on elektriliselt võrdlemisi tugev (minimaalseks lühisvõimsuseks 2280 MVA). Sellest tulenevalt on ka alajaamale avalduvad mõjud võrdlemisi väikesed, maksimaalseks pingetõusu väärtuseks kogu pidurdusperioodil on 0,47 kV. Vastavalt ülekandevõrgu alajaamade elektrilisele tugevusele ja nendevaheliste ühenduste pikkusele sumbub regeneratiivsest pidurdusest tingitud pingetõus ning ei põhjusta märkimisväärsed muutusi ülekandevõrgu alajaamade pingetõustes. Samuti ei ilmne märgatavaid muutusi alajaama Bus 4 ühendatud generaatorite talitluses.

Ülekandevõrgu lõunaosas on elektriraudtee koormuse liitumispunktina analüüsitud Bus 21 alajaama, mis on kontaktvõrgu muutustele mõnevõrra tundlikum. Vedurite regeneratiivsel pidurdamisel tõuseb pingetõus Bus 21 alajaama liitumispunktis maksimaalselt 1,69 kV võrra, mis on palju enam kui Bus 4 alajaama korral. Tuntav pingetõus kandub liitumispunktis edasi ka teistesse ülekandevõrgu alajaamadesse, kus nii Bus 20, Bus 19, Bus 15 ja ka Bus 18 alajaamades tõusis faasidevahelise pingetõusu väärtus üle 1 kV. Kõigis teistes piirkonna ülekandevõrgu alajaamades oli regeneratiivsest pidurdusest tingitud maksimaalne pingetõus alla 1 kV. Hoolimata tuntavast pingetõusust Bus 21 alajaamas, ei too regeneratiivne pidurdamine endaga kaasa märgatavaid muutusi alajaamade faasipingetes. Samuti ei põhjusta vedurite regeneratiivne pidurdus muutusi ülekandevõrgu Pärnumaa piirkonna Bus 32 alajaama ühendatud generaatori väljundparameetrites.

Tulenevalt asjaolust, et analüüsitud simulatsioonid korraldati situatsioonis, kus kontaktvõrgus pidurdab korraga kaks vedurit ja puudub kogu ülejäänud tavaolukorras pidurdusenergiat tarbiva rongi koormus, on ilmnenuvad mõjud minimaalsed. Ülekandevõrgu põhjaosas, kus tegemist on võrdlemisi tugeva elektrivõrguga, pole regeneratiivsest pidurdusest tulenevad mõjud märgatavad. Mõnevõrra nõrgemas ülekandevõrgu lõunaosas ilmneb Raplamaa piirkonna liitumispunktil Bus 21 alajaamas väikseid kõikumisi alajaama pingetõustes. Ülekandevõrgus paiknevatel generaatoritel vedurite regeneratiivne pidurdamine mõju ei avalda.

5.3.4. Pingesümmeetria mõju ülekandevõrgule ja generaatorite talitlusele

Elektriraudtee koormusest tingitud ülekandevõrgu pingesümmeetria mõjutab nii generaatorite talitlust kui ka teisi ülekandevõrgu tarbijaid. Võimalike negatiivsete mõjude vältimiseks on pingesümmeetria kehtestatud maksimaalsed lubatavad piirmäärad.

Läbiviidud simulatsiooni tulemuste analüüsi põhjal selgub, et ülekandevõrgu põhjaosas ei ületata kehtestatud piirmäärasid ja seega pingesümmeetria otseseid probleeme ei tekita. Küll aga tuleks arvestada pingesümmeetria kumulatiivse olemusega, mis võib mõjutada teiste ülekandevõrgu häiringute ulatust ja mõju.

Pingesümmeetria mõjude analüüsimisel pöörati tähelepanu ka ülekandevõrgu põhjaosas alajaama Bus 4 lattidele ühendatud generaatorite talitlusele. Tulemustest selgus, et ülekandevõrgu põhjaosas tekkiv pingesümmeetria on võrdlemisi madal, põhjustamaks generaatoritele seatud piirmäärade ületamist. Seega on võrgu normaalskeemi juures elektriraudtee koormust võimalik ühendada kõikidesse läbiviidud simulatsioonide põhjal analüüsitud ülekandevõrgu põhjaosa alajaamadesse.

Võrreldes põhjaosaga, tekib ülekandevõrgu lõunaosas iga potentsiaalse liitumispunkti korral pingesümmeetria seisukohast probleeme, kuna 1% pingesümmeetria piirmäär ületatakse igal juhul.

Elektriraudtee koormuse liitumisel alajaama Bus 21 ületab tekkiv pingesümmeetria ka 2% piirmäära ning seda nii jõu- kui ka Scott-trafo rakendamisel, vastavate väärtustega 2,40% ja 2,51%. Lisaks liitumisalajaamale kandub pingesümmeetria edasi ka teistesse ülekandevõrgu sõlmpunktidesse, mistõttu alajaamas Bus 20 ületatakse samuti 2% piirmäära. Lisaks ilmneb 1% piirmäära ületav pingesümmeetria veel alajaamades Bus 19, Bus 18 ja Bus 15. Viimastele lisandub Scott-trafo rakendamisel selle sümmeetrilise koormatuse korral ka alajaam Bus 34. Saadud tulemuste põhjal ei täideta elektriraudtee liitumisel alajaama Bus 21 praegusel kujul nõutud pingesümmeetria tingimusi. Elektriraudtee liitumine saab võimalikuks ainult Scott-trafo rakendamisel, juhul kui suudetakse tagada trafo sümmeetriline koormatus, kuna sel tingimusel on ülekandevõrgus tekkiv pingesümmeetria minimaalne. Paraku on elektriraudteeliinidel selle tingimuse täitmine keeruline ülesanne.

Elektriraudtee koormuse liitumisel alajaama Bus 33 ületab tekkiv pingesümmeetria samuti kehtestatud 1% piirmäära ning seda lisaks liitumisalajaamale Bus 33 ka alajaamades Bus 24, Bus 23, Bus 34, Bus 35, Bus 32, Bus 31 ja Bus 37. Seega on elektriraudtee koormuse liitumisel tugevalt mõjutatud kogu Pärnumaa piirkond. Erinevalt eelnevalt kirjeldatud liitumisalajaamale Bus 21 ei ületa aga elektriraudtee liitumine Bus 33 alajaamas pingesümmeetria 2% piirmäära.

Alajaama Bus 35 mittesobivust elektriraudtee liitumispunktiks on juba eelnevalt mitmeti põhjendatud ja seda kinnitab ka pingesümmeetria analüüs. Nii jõu- kui *Scott*-trafo rakendamisel on alajaama Bus 35 pingesümmeetria 4% ja enam ning omab kaugemale ulatuvat mõju.

Generaatori seisukohast on täiendavalt elektriraudtee liitumispunktina analüüsitud ka alajaama Bus 32, hindamaks suurimat võimalikku generaatorile kaasnevat mõju. Alajaama Bus 32 lattidel avalduva pingesümmeetria väärtuseks saadi 3%. Lisaks ületas edasikanduv pingesümmeetria 2% piirmäära alajaamades Bus 37 ja Bus 31 ning 1% piirmäära alajaamades Bus 30, Bus 24, Bus 23, Bus 33 ning Bus 34. Nii jõu- kui ka *Scott*-trafo rakendamisel on pingesümmeetria tase võrgus kõrge ning seega ei ole elektriraudtee liitumine alajaamas Bus 32 sobivaks lahenduseks. Võttes arvesse generaatoritele avalduva mõju piirmäärasid (tabel 4.1), selgub saadud tulemustest, et elektriraudtee ühendamisel alajaama Bus 32 ületab püsiva voolu vastujärgnevuskomponent kehtestatud 10% piirmäära, seda asümmeetriliselt koormatud *Scott*-trafo rakendamisel. Jõutrafo rakendamisel on saadud tulemused mõnevõrra paremad, kuid see on siiski piirmäärale lähedane 9,51%. Seega on mõlema trafoühenduse korral oht, et generaator saab kahjustada.

Alajaama Bus 32 ühendatud generaatorile avalduv mõju on väikseim olukorras, kus elektriraudtee koormuse liitumispunktiks ülekandevõrgu lõunaosas on alajaam Bus 21. Elektriraudtee koormuse liitumisel alajaama Bus 33 ei ületa tekkiv voolu vastujärgnevuskomponendi osakaal asümmeetrilise talitluse piirmäära, kuid moodustab sellest ligi poole. Simulatsiooni tulemuste põhjal on elektriraudtee koormuse liitumine alajaamas Bus 33 generaatori puhul võimalik, kui piiratakse asümmeetriliste lühiste kestvust ülekandevõrgus, kuna generaatoril puudub püsivalt kestva asümmeetrilise talitluse korral võimekus taluda pikki (enam kui 120 sekundit) asümmeetrilisi lühiseid.

Ülekandevõrgu lõunaosa mudeli pingesümmeetria analüüs näitas, et elektriraudtee koormuse ühendamisega kaasneb märkimisväärne pingesümmeetria, mis ületab ülekandevõrgus kehtestatud piirmäärad kõikide vaadeldud stsenaariumide korral. Ülekandevõrgu lõunaosa on elektriliselt võrdlemisi nõrk ning elektriraudtee liitumisega kaasnevate probleemide vältimiseks tuleb rakendada täiendavaid meetmeid. Sümmeetriliselt koormatud *Scott*-trafo rakendamine oleks teatud tingimustel lahenduseks, kuna sümmeetrilisel talitlusel on tekkiv pingesümmeetria madalam ($k_g = 0-0,1\%$). Seega oleks võimalik minimeerida alajaamade Bus 21 ja Bus 33 pingesümmeetria mõjusid. Paraku ei ole aga elektriraudtee kontaktvõrgus võimalik tagada täielikult sümmeetrilist koormust, mistõttu pole *Scott*-trafo rakendamine probleemi likvideeriv lahendus. Täiendavaks lahenduseks pingesümmeetria silumisel on *FACTS*-seadmete kasutamine. See nõuab siiski põhjalikku tehnilist analüüsi ja elektrivõrgu ning elektriraudtee ühenduse vastastikmõjude kompleksset hindamist.

Detailsem ülevaade elektriraudtee talitluse põhjustatud pingesümmeetria mõjudest ja nende levikust ülekandevõrgus annavad allikad [46; 70].

5.3.5. Toitepiirkondadeülese liikumise mõju

Elektriraudtee veokoormust toitev kontaktvõrk on kogu raudteetrassil jagatud ülekandevõrgu toitealajaamade vahel toitepiirkondadeks. Rongi liikumisel trassil toimub iga 50 km tagant üleminek ühe alajaama toitepiirkonnast teise kohtades, kus kontaktvõrgus on loodud selleks vastav vahemik ning toimub veduri sujuv üleminek.

Eelnevalt kirjeldatud analüüsi tulemused näitavad, et elektriraudtee koormuse liitumisel on selle talitlusest tulenevad mõjud suuremad ülekandevõrgu lõunaosas. Seetõttu on veokoormuse ühe alajaama toitepiirkonnast teise siirdumisega kaasnevaid võimalikke mõjusid analüüsitud just ülekandevõrgu lõunaosa alajaamade Bus 21 ja Bus 33 toitepiirkondade vahel. Lisaks kuuluvad valitud alajaamad ka ülekandevõrgu pikka toiteringi, kus alajaamasid ühendav elektrivõrk on võrreldes põhjaosaga hõredam ning alajaamadevahelised kaugused on märgatavalt pikemad. Nende asjaolude põhjal saab eeldada, et alajaamade Bus 21 ja Bus 33 toitepiirkondade vaheline üleminek on kogu ülekandevõrgu ja *Rail Balticu* trassi osas kõige probleemsem. Seega on simulatsiooni tulemused kõige selgemini eristuvad, andes

eelduse konkreetsete järelduste tegemiseks ka ülejäänud trassile kuuluvate liitumisalajaamade vahelise koormuse siirdumisel.

Simulatsiooni tulemustest selgub, et elektriraudtee koormuse siirdumine alajaamade Bus 21 ja Bus 33 vahel ei too endaga kaasa märgatavaid muutusi ülekandevõrgus. Koormuse lahkumisel alajaama toitepiirkonnast täheldati mõningast pinge väärtuse tõusu selle lattel ning vastupidi, koormuse sisenemisel alajaama toitepiirkonda pinge langemist. Need muutused pinge väärtustes olid aga väikesed, suurim pinge muutus leidis aset koormuse siirdumisel alajaama Bus 21 toitelt Bus 33 toitele esimese lattel, väärtusega 1,01 kV. Bus 21 – Bus 33 ja Bus 33 – Bus 21 suunaliste tulemuste võrdlusel võis alajaamade faasidevahelistes pingetes täheldada, et koormuse siirdumisel kõigub pinge enim selles alajaamas, mille toitepiirkonnast veokoormus lahkub, võrreldes alajaamaga, mille toitepiirkonda veokoormus siseneb. Alajaama Bus 21 puhul on tegemist elektriliselt mõnevõrra nõrgema alajaamaga, kui seda on Bus 33, kus minimaalsed lühisvõimsused alajaamades on vastavalt 940 MVA ja 1062 MVA. Sellest tulenevalt on alajaam Bus 21 koormuse siirdumisega kaasnevatel muutustel mõnevõrra tundlikum.

Olukorras, kus elektriraudtee koormus ühendatakse ülekandevõrku läbi *Scott*-trafo, märkimisväärseid erinevusi võrreldes jõutrafoaga ei ilmnenud. *Scott*-trafo rakendamisel oli koormuse siirdumisel märgata mõnevõrra väiksemat faasidevahelise pinge väärtuste muutust kui jõutrafo rakendamisel. Kahe trafoühenduse simulatsiooni tulemuste erinevus on 0,1 kV lähedal, mistõttu võib seda lugeda arvutuslikuks veaks ning seega ei saa teha konkreetseid järeldusi ühe trafoühenduse eelistamiseks teisele teatud koormuste ja ülekandevõrgu konfiguratsiooni juures.

Analüüsi käigus vaadeldud *Rail Balticu* trassi Pärnu piirkonda kuuluva alajaama Bus 32 ühendatud generaatorile koormuse siirdumine ühegi vaadeldud olukorra puhul mõju ei avaldanud.

Läbiviidud simulatsioonide ning eespool mainitu põhjal, kus *Rail Balticu* potentsiaalsetes liitumispunktides on alajaamade Bus 21 ja Bus 33 vaheline ühendus kõige tundlikum, saab väita, et elektriraudtee koormuse siirdumine ühest liitumispunkti alajaama toitepiirkonnast teise ei avalda märgatavat mõju vaadeldud ülekandevõrgule ja selles talitlevatele generaatoritele.

5.3.6. Mõjud ülekandevõrgu teistele tarbijatele

Elektriraudtee koormuse ühendamine elektrivõrku toob kaasa muutusi ja kõikumisi sõlmalajaamade latipingetes, mistõttu on häiritud ülekandevõrgu tavapärase talitus. Sellest tulenevalt võib eeldada, et elektriraudtee talitusrežiimidest tingitud häiringud ja elektri kvaliteedinäitajate langus kandub edasi ka ülekandevõrgu trafo sekundaarpoolele, avaldades seeläbi mõju ülekandevõrguga ühendatud teistele tarbijatele.

Hindamiseks elektriraudtee koormusega kaasnevat mõjusid teistele tarbijatele, on elektriraudtee talitusrežiime analüüsitud jaotusvõrgu kontekstis, lähtudes juba eelnevalt kirjeldatud simulatsioonistsenaariumitest. Põhjalikuma ülevaate analüüsi käigus saadud tulemustest annab allikas [70].

Pikendatud lühisetalitus

Kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitusel analüüsitakse selle mõjude edasikandumist ülekandevõrgu sekundaarpoolele ja hinnatakse mõjude ulatust ülekandevõrgu tarbijatele. Saadud tulemustest selgub, et elektriraudtee pikendatud lühisetalitus kontaktliini lõpus ei mõjuta ülekandevõrgu teisi tarbijaid mitte ühelgi vaadeldud juhtumil. Lühisekoha nihkumisel aga veoalajaama vahetusse lähedusse selgub, et ülekandevõrgu põhjaosas liitumisalajaama Bus 4 ning ülekandevõrgu lõunaosas liitumisalajaama Bus 33 puhul on mõjud tarbijatele mõnevõrra märgatavamad, kuid siiski ei vaja lühiste seisukohast täiendavate meetmete rakendamist. Erinev on olukord ülekandevõrgu lõunaosas analüüsitud liitumisalajaamades Bus 21 ja Bus 35, kus kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitlusega kaasneva pingelohu tõttu võivad pingetundlikumad ning alapingekaitsemega seadmed välja lülituda. Elektriraudtee koormuse liitumisel nendes alajaamades tuleb kasutusele võtta täiendavaid meetmeid, tagamaks kontaktvõrgu lühiste lühemat kestvust.

Regeneratiivne pidurdamine

Veduri regeneratiivse pidurdamisega kaasneb kontaktliinis pinge väärtuse tõus, mis pidurdamisel vabaneva energia sealse mittetarbimise juures kandub teataval määral üle ülekandevõrgu liitumisalajaamadesse. Veduri regeneratiivse pidurdamisega kaasneva mõju analüüsist selgub, et vedurite regeneratiivse pidurdamisega ei kaasne märgatavaid mõjusid ülekandevõrgu teistele tarbijatele. Saadud tulemuste põhjal ei teki seega otseseid takistusi regeneratiivse pidurdamise lubamiseks elektriraudtee kontaktvõrgus.

Pingeasümmeetria

Analüüsid elektriraudtee talitlusest põhjustatud pingeasümmeetriat, selgub, et ülekandevõrgus tekkinud pingeasümmeetria kandub edasi muutumatul kujul trafode keskpingepoolle, avaldades seega mõju ka jaotusvõrgu tarbijatele.

Ülekandevõrgu põhjaosas tekkiva pingeasümmeetria mõjud on tarbijatele küll märgatavad, kuid jäävad lubatud piirmääradesse. Sellest tulenevalt on pingeasümmeetriat vähendavate meetmete rakendamine eelkõige soovituslik.

Ülekandevõrgu lõunaosas on elektriraudtee koormusest tingitud pingeasümmeetria piirmäärad märgatavalt suuremad. Saadud tulemuste põhjal selgub, et elektriraudtee liitumisel alajaamas Bus 33 on kaasnev pingeasümmeetria ülekandevõrgu teistele tarbijatele küll väiksem, võrreldes analüüsi käigus vaadeldud teiste liitumisalajaamadega, kuid sellest hoolimata on tarvis rakendada täiendavaid meetmeid, minimeerimaks ülekandevõrgu tarbijatele avalduvaid mõjusid. Tekkinud pingeasümmeetria on kehtestatud piirmäära saavutamisele võrdlemisi lähedal ning võrgus esinevate täiendavate häiringute korral võidakse seda ületada.

Elektriraudtee koormuse liitumisel ülekandevõrgu lõunaosas alajaamades Bus 21, Bus 32 ja Bus 35 selgus analüüsi tulemustest, et neil juhtumitel ei ole võimalik täita elektri kvaliteedinõudeid jaotusvõrgus. Piirmäära ületav pingeasümmeetria põhjustab olulisi võimsuskadusid tarbijate elektrimootorites ning suurendab ohtu tarbija elektripaigaldistele. Seega on nii Bus 21, Bus 32 kui ka Bus 35 alajaamade korral nõutud pingeasümmeetria vähendamiseks täiendavate lokaalsete meetmete rakendamist elektriraudtee koormuse ühendamisel.

Toitepiirkondadeülene liikumine

Elektriraudtee koormuse liikumisel ühe liitumisalajaama toitepiirkonnast teise kaasneb teatav pinge väärtuse kõikumine alajaamade latipingetes. Hindamiseks talitluse mõjude ülekandumist ülekandevõrgu teistele tarbijatele, on vaadeldud eelduste kohaselt kõige enam mõjutatavat stsenaariumit, kus elektriraudtee koormus siirdub ülekandevõrgu lõunaosas alajaamade Bus 21 ja Bus 33 toitepiirkondade vahel. Saadud tulemuste põhjal selgus, et koormuse siirdumine nii Bus 21-Bus 33 kui ka Bus 33-Bus 21 toitepiirkondade suunas, toob alajaamade latipingetes kaasa sedavõrd väikesed muutused, et need ei avalda mõju ülekandevõrgu teistele tarbijatele. Tulenevalt elektriraudtee koormuse siirdumisega kaasnevast mõnevõrra erinevast koormusvoogude jagunemisest, võib elektriraudtee talitlusrežiim põhjustada probleeme ülekandevõrgu operatiivtalitluses.

Kokkuvõte

Käesolev teadustöö aruanne käsitleb elektriraudtee elektrisüsteemiga liitumisega seotud temaatikat. Olulisel kohal on elektriraudtee mõjude hindamine ja analüüs ülekandevõrguoperaatori poolelt vaadatud. Lähitulevikus on oodata elektriraudtee liitumist Eesti 110 kV ülekandevõrguga, mistõttu on see temaatika ka Eesti elektrisüsteemi kontekstis oluline.

Elering on oma teadus- ja arendustegevuse raames koostöös TTÜ elektroenergeetika instituudiga aastatel 2012–2014 läbi viinud projekti „Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele“ ning uurinud elektriraudtee olemust ja mõjusid. Töö raames on välja töötatud mitmeid mudeleid elektriraudtee kontaktvõrgu ja elektrirongide matemaatiliseks modelleerimiseks. Samuti on tehtud põhjalik analüüs, mille alusel on kujunenud arusaam, millest tuleb lähtuda ja mida arvestada võimalikul elektriraudtee liitumisel. Töö tulemused on avaldatud mitmes teadusartiklis.

Teadustöö raames vaadeldi elektriraudtee liitumisega seotud mõjusid ülekandevõrgule normaalalustustingimustel. Vaadeldi kontaktvõrgu pikendatud lühisetalitluse, vedurite regeneratiivse pidurdamise, pingesümmeetria, koormuse ühest liitumispunktist teise siirdumise mõjusid ning mõjusid teistele ülekandevõrgust toidetavatele tarbijatele. Kokkuvõtvalt on olulisimad järeldused järgmised:

- Elektriraudtee kontaktliini lühisega kaasneb liitumispunkti alajaamas lühise ajaperioodil latipinge väärtuse alanemine ehk pingelohk, mis levib liitumispunkti alajaamast edasi teistesse ülekandevõrgu sõlmpunktidesse. Tekkiva pingelohu väärtus on sõltuvuses alajaamade elektrilise tugevusega ehk lühisvõimsuse väärtusega. Lühisest tingitud pinge väärtuse alanemine põhjustab asümmeetriat alajaamade faasipingetes vastavalt nende koormatavusele ja pingelanguse ulatusele.
- Regeneratiivsel pidurdamisel kasutatakse mootori pööremistakistust ratastega pidurdamiseks. Pidurdusrežiimil töötab veduri mootor aga generaatorina, kus pöördejõu allikaks on rongi inertsjõud. Pidurdusenergia elektrivõrku suunamisel tuleb silmas pidada kontaktvõrgus kaasnevat pinge väärtuse tõusu ja selle kandumist ülekandevõrku.
- Pinge- ja voolasümmeetria põhjustavad generaatoris järgnevaid mõjusid:
 - generaatori rootori ülekuumenemist;
 - generaatori võimsuskao (sh elektrijaama kütusekulu) suurenemist;
 - turbiini ja generaatori võlli vibratsiooni;
 - turbiini ja generaatori võlli mehaanilisest võnkumisest tingitud vändumist.
- Elektrivõrgu talitluse analüüsil on oluline jälgida generaatori vastujärgnevuskomponendi suurust, kuna selle suurenemisel üle lubatud väärtuse lülitab releekaitse generaatori välja.
- Rongi liikumisel trassil toimub teatud arvu kilomeetrite tagant üleminek ühe alajaama toitepiirkonnast teise. Koormuse lahkumisega alajaama toitepiirkonnast ilmneb selle lattel pingetõus, ning vastupidi, koormuse sisenemisel alajaama toitepiirkonda pinge langeb.
- Elektriraudtee liitumisega võib kaasneda mittesoovitav mõju võrgu teistele tarbijatele. Ette võib tulla elektri kvaliteedi piirnormide ületamist. Mõju suurus oleneb liitumispunkti asukohast võrgus ning kasutatavate parendavate meetmete põhimõttes ja efektiivsuses.

Võttes üldistatult saadud tulemused kokku, siis elektriraudtee liitumisel tuleb hoolikalt jälgida, missugustes ülekandevõrgu punktidesse võimalikud liitumispunktid tulevad. Tehniliste tingimuste väljatöötamisel tuleb arvestada piirkonna ülekandevõrgu tugevust ja elektriraudtee süsteemi maksimaalset koormust.

Elektri kvaliteedi tagamiseks on kindlasti tarvis elektriraudtee liitujale seada piirnormid, millele vastavust tuleb enne ehitusprotsessi alustamist kontrollida arvutustega ja hilisemas faasis reaalsete katsetustega. Tarvis on määratleda nõuded harmoonikute tasemele ja asümmeetriale, samuti voolu vastujärgnevuskomponendile ja pinge muutustele. Harmoonikute suurus liitumispunktis sõltub otseselt

kasutatava ajami tüübist (türistoridel põhinevad seadmed on kehvemad kui uuemad transistoridel põhinevad lahendused) ja filtritest. Võrguettevõtjal tuleb samuti määratleda pingelohkude võimalikkus ja nende kestus ning muud võimalikud elektriraudtee talitlusele mõju avaldavad tegurid. Siinkohal on oluline juba plaanimise etapis järgida kõiki nõudmisi, et seeläbi vältida võimalikke hilisemaid probleeme. Uurimistöö raames lähtuti tänasel päeval kehtivatest elektri kvaliteedi piirnormidest ja saadud tulemuste kohaselt on määratletud piirnormidega toimetulek võimalik, kuid olenevalt liitumispunktist võib tekkida vajadus täiendavate meetmete järele.

Elektriraudtee talitluse mõjude seisukohalt on määravaks liitumispunktis kasutatavate vahetrafo tüüp. Ideaaltingimuste juures, mis eeldab kontaktvõrgusüsteemis ühtlase sümmeetrilise koormuse olemasolu, on soosituim *Scott*-trafo. Sellisel juhul osutub ülekandevõrgu poolelt nähtuna võimalikuks asümmeetria täielik silumine. Paraku on pikkadel kiirraudteeliinidel selliste tingimuste tagamine peaaegu võimatu. Lähtudes uurimustöö tulemustest ja pidades silmas *Rail Balticu* projekti raames rajatava liini omadusi, on soovitatav kasutada kas ühefaasilist jõutrafo või autotrafo. Ülekandevõrgule on nende kaht tüüpi trafo mõju sarnane. Sellisel juhul tuleb aga arvestada asümmeetria olemasoluga, mis oma väärtuselt on väiksem kui sama asümmeetrilise koormuse tingimustel rakendatava *Scott*-trafo korral.

Regeneratiivse pidurdamise seisukohast tuleb võrguettevõtjal arvestada, et selle lubamisel ei ole elektriraudtee liitumise korral tegemist enam üksnes tarbimiskoormusega, vaid võib ette tulla olukordi, kus elektriraudtee annab võimsust võrku tagasi. Sellest tulenevalt on vaja regeneratiivse pidurdamise lubamisel kaaluda erinevaid variante otsustamiseks, kas siis sõltuvalt piirkonnast või muudest teguritest sellist funktsionaalsust lubada või mitte. Juhul, kui võrguoperaator ei ole huvitatud tagurpidi koormusest (tootmisest), tuleb see kindlasti liitujaga kokku leppida võimalikult varajases faasis.

Elektrivõrgu talitluse modelleerimiseks ja analüüsimiseks on tarvis nii rongide vedurite kui ka elektriraudtee kontaktvõrgu mudelid. Käesolevas töös on esitatud kontaktvõrgu ja rongide vedurite mudelid, kuid siiski tuleb siin arvestada, et tegelikkuses kasutatavad lahendused võivad omada mõnevõrra teistsuguseid karakteristikuid.

Elektriraudtee elektrivõrgus kasutatakse samuti releekaitset, mistõttu on oluline koordineerida omavahel ülekandevõrgu ja elektriraudtee tarbija releekaitse. Omavahel tuleb ajaliselt koordineerida kaitsete sätted, mille peamine eesmärk on rike lokaliseerimine elektriraudtee valdustesse, et mitte põhjustada mõne ülekandevõrgu elemendi releekaitse väärtöötamist. Kaitsete koordineerimisel tuleb teha koostööd nii ülekandevõrgu kui ka elektriraudtee spetsialistide vahel.

Kokku tuleb leppida vajalik infovahetuse kord. Siinkohal tuleb arvestada, missuguseid signaale võiks võrguettevõtjal tarvis olla. Näiteks veduri regeneratiivsel pidurdamisel edastatakse võrguettevõtja dispetšitalitlusele vastav signaal. Samuti tuleb kokku leppida nii liitumispunkti kui ka veoalajaama erinevate lülitite ja funktsioonide juhtimise osas. Soovitatavalt peab häiringu korral olema võimalik tarbija kiiresti välja lülitada.

Raudtee ja ülekandevõrgu talitluse juhtimise raames on soovituslik mitte lubada paralleeltööd läbi elektriraudtee võrgu, st kõik üleminekud erinevate piirkondade vahel toimuvad katkestustega. Eeldatavalt on võimalik kasutada paralleelset elektriraudtee konfiguratsiooni, kuid kindlasti peab see alati talitlema radiaalse võrguna.

Käesoleva teadustöö tulemused omavad olulist rolli elektriraudtee mõjude hindamisel ülekandevõrgu talitlusele. Samas tuleb siinkohal siiski mainida, et teadustöö eesmärgiks on olnud hinnata elektriraudtee ja elektrisüsteemi vahelist talitlust lähtuvalt teaduslikest põhimõtetest. Eesmärk on olnud hinnata erinevate lahenduste üldist mõju ning nende võimalikke eelseid ja puudusi. Teadustöö raames ei otsitud, arvatud ega analüüsitud konkreetseid ja reaalsetes projektides vajalikke lahendusi ega vaadeldud nende mõju lähtuvalt konkreetsest liitumispunktist.

Kirjandus

- [1] S. Östlund. Rail Power Supplies Going More Power Electronic. IEEE Electrification Magazine, September 2014, pp. 4-60.
- [2] A. Steimel. Electronic Grid Supply of AC Railway Systems. 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Braslov, Romania, 24-26 May, 2010, pp.16-25.
- [3] B. Ross. 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.
- [4] Railway Technical Web Pages. Electronic Power for Trains. [Online] <http://www.rail-way-technical.com/tract-02.shtml>
- [5] M. Helme. „Rong see sõitis...“ Tehnikamaailm, Juuni 2009. [Online] <http://www.tehnikamaailm.ee/est/tm/2009/06/?headerID=1608> [13.12.2012]
- [6] „FLIRT, superkiirendusega moodne rong, jõuab Eesti pinnale juba sel kuul“. Inseneeria, November 2012, pp. 10-11.
- [7] V. Kala. „Šveitsi rongid tulevad!“. Tehnikamaailm, Oktoober 2011. [Online] <http://www.tehnikamaailm.ee/est/tm/2011/10/?headerID=2289> [13.12.2012]
- [8] Elron. [Online] www.elron.ee [18.05.2015]
- [9] Electrification Systems in Europe. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Railway_electrification_system#/media/File:Europe_rail_electrification_en.svg [18.05.2015]
- [10] Railway transport - Length of electrified lines, by type of current. [Online] <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/> [13.12.2012]
- [11] L. Ojala. Transport Infrastructure Investments in the Baltic Sea Region 2007-2013. Regional Workshop on Public-Private Partnership (PPP) in Transport, Riga, Latvia, 7 March, 2007, 15 pp.
- [12] European Commission, Mobility and Transport. Infrastructure - TEN-T - Connecting Europe. [Online] http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/index_en.htm [12.2013]
- [13] A. Kozlak. Opportunities of Integration of South-East Baltic Sea Region in the Light of EU Transport Policy. Proceedings of the 6th International Scientific Conference TRANSBALTICA 2009, April 2009. pp. 109-113
- [14] European Commission, Mobility and Transport. Infrastructure - TEN-T - Connecting Europe, TEN-T Core Network Corridors. [Online] http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/news/2015-05-28-coordinator-work-plans_en.htm [28.05.2015]
- [15] H. Adelsberger, H. Eicher. The Koralm-Line as a Part of Wider European Railway Connections - Integrated in the Baltic-Adriatic-Axis. Geomechanik und Tunnelbau, Vol.1, No.4, August 2008, pp. 250-255.
- [16] Konsortsium: Raalprojekt, Hendrikson&Ko, KELPROJEKTAS, EA Reng, WSP. *Rail Baltic* 1435 mm trassi Harju, Rapla ja Pärnu maakonnaplaneeringute keskkonnamõju strateegiline hindamine. 26. August 2013, 26 lk. [Online] <http://www.railbaltic.info/et/materjalid/materjalid-1/maakonnaplaneeringud-1/-8/7/2-maakonnaplaneeringute-laehteseisukohad-20130826/file>

- [17] Euroopa Komisjon Regionaalpoliitika Peadirektoraat, COWI AS. *Rail Balticu* raudtee teostatavusuuring. Peamised järeldused ja soovitused. Jaanuar 2007, 17 lk. [Online] http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/evaluation/railbaltica/concl_et.PDF
- [18] AECOM Transpordisektor. *Rail Baltica* lõpparuanne. Mai 2011, 29 lk.
- [19] R. J. Hill. Electric railway traction. Part 3 Traction power supplies. IEE Power Engineering Journal, Vol.8, No.6, December 1994, pp. 275-286.
- [20] F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider. Contact Lines for Electric Railways. Erlangen, Publicis Publishing, 2009/2012, 994 pp.
- [21] Y. Oura, Y. Mochinaga, H. Nagasawa. Railway Electric Power Feeding System. Railway Technology Today 3. Japan Railway & Transport Review, June 1998, pp. 48-58.
- [22] T. H. Chen, H-Y. Kuo. 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.
- [23] M. Kalantari, M. J. Sadeghi, S. S. Fazel, S. Farshad. 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.
- [24] L. Hanmin, O. Sehchan, K. Gildong, A. Cheonheon. A Study on the Equivalent Conductor Representation of AC Electric Railway System. International Conference on Information and Multimedia Technology, ICIMT 2009, Jeju Island, South Korea, 16-18 December 2009, pp. 33-37.
- [25] H. Yu, Y. Yue, C. Zhe, C. Zhifei, T. Ye. Research on the Selection of Railway Traction Transformer. 2010 Conference Proceedings IPEC, Singapore, 27-29 October 2010, pp. 677-681.
- [26] T. K. Ho, Y. L. Chi, J. Wang, K. K. Leung, L. K. Siu, C. T. Tse. Probabilistic load flow in AC electrified railways. IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol.152. No.4, July 2005, pp. 1003-1013.
- [27] I. Senol, H. Görgün, M. Gürkan Aydeniz. 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, Israel, 18-20 May 1998, Vol.2, pp. 885-887.
- [28] T. A. Kneschke. 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.
- [29] K. Agarwal, S. Candlish, T. Carney. Automatic Fault Location and Isolation System for the Electric Traction Overhead Lines. 2002 ASME/IEEE Joint Railroad Conference, Washington, DC, USA, 23-25 April 2002, pp. 117-122.
- [30] L. Abrahamsson, L. Söder. 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.
- [31] В. П. Феоктистов, Г. Г. Рябцев, Ю. Е. Просви́ров, В. Н. Пупынин, Е. К. Рыбников, С. В. Володин. В.В. Иванов. Электрические железные дороги, В. П., Просви́ров, Ю. Е. Феоктистов, Ed. Москва, Самара: СамГАПС, 2006.
- [32] З. Дубровский, В. Попов, Б. Тушканов. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. Москва: Транспорт, 1991.
- [33] А. И. Тищенко, Ed. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам. Москва: Транспорт, Vol.1, 1976.
- [34] S. Östlund. Electric Railway Traction. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2012

- [35] Railway Technical Web Pages. High Speed Train Links Page. [Online] <http://www.railway-technical.com/hst-01.shtml>
- [36] Energy Efficiency Technologies for Railways. IGBT, October 2002. [Online] http://www.railway-energy.org/static/IGBT_28.php
- [37] C. J. Goodman. Overview of Electric Railway Systems and The Calculation of Train Performance. IET Professional Development Course on Electric Traction System, 2010, pp. 1-24.
- [38] A. Capasso. The power quality concern in railway electrification studies. 8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings, Vol.2, October 1998, 647-652 pp.
- [39] T. Kneschke. Control of Utility System Unbalance Caused by Single-Phase Electric Traction. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.21, No.6, 1985, pp. 1559-1570.
- [40] P. Heine, M. Hyvärinen, J. Niskanen, A. Oikarinen, H. Renner, M. Lehtonen. The Impact of 50 Hz Railroad Systems on Utility System Power Quality. Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ) Conference, Kuressaare, Estonia, 16-18 June 2010, pp. 61-66.
- [41] Euroopa Standard EN 50160:2010. Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks. July 2010.
- [42] N. Golovanov, M. Roscia, D. Zaninelli. Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power Systems Supplying High Speed Railway. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 12-16 June 2005, San Francisco, USA, pp. 2509-2514.
- [43] OÜ Põhivõrk. Elektri kvaliteet OÜ Põhivõrk 110 kV võrgus. VJ18. Kinnitatud 18.06.2008
- [44] A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai, F. Ma. 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.
- [45] J. Kilter, T. Sarnet, T. Kangro. Assessment of Transmission Network Voltage Unbalance in Connection of High-Speed Electrical Railway Connection, 9th International Conference Electric Power Quality and Supply Reliability, Rakvere, Estonia, 11-13 June 2014.
- [46] Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele, Projekti II etapi aruanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2014, 266 lk.
- [47] J. Wang, R. Hamilton. A Review of Negative Sequence Current, 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, March/April 2010, College Station, TX, USA, pp. 1-18.
- [48] IEEE Standard C50.13/D1. IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above. 2013, 61 pp.
- [49] IEEE Standard C37.102. IEEE Guide for AC Generator Protection. 2006, 177 pp.
- [50] I. E. Pollard. Effects of Negative-Sequence Current on Turbine-Generator Rotors. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Power Apparatus and System part III, Vol.72, No.2, 1953, 3 pp.
- [51] C. A. Williamson, B.E. Urquhart. Analysis of the Losses in a Turbine-Generator Rotor Caused by Unbalanced Loading. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.123, No.12, 1976, 7 pp.
- [52] H. Lee, C. Lee, G. Jang, S. Kwon. 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.
- [53] A. Dolara, M. Gualdoni, S. Leva. 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, Italy 26-29 September 2010, pp. 1-8.

- [54] Z. Ye, E. Lo, K. H. Yuen, M. H. Pong. Probabilistic Characterization of Current Harmonics of Electrical Traction Power Supply System by Analytic Method. 25th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON'99 Proceedings, San Jose, USA, Vol.1, November 1999, pp. 360-366.
- [55] K. H. Yuen, M. H. Pong, W. C. Lo, Z. M. Ye. Modeling of Electric Railway Vehicle for Harmonic Analysis of Traction Power-supply System using Spline Interpolation in Frequency Domain. 14th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '99, Dallas, TX, USA, 14-18 March 1999, Vol.1, pp. 458-463.
- [56] L. Hang, L. Qunzhan, G. Frenghua. Traction Power System Model and Simulation for Estimation and Forecast of Traction Load. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Chengdu, China, 28-31 March 2010, pp. 1-4.
- [57] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter. Jaotusvõrgud. TTÜ Kirjastus, 2007, 546 lk.
- [58] H. E. Mazin, W. Xu. 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, USA, 20-24 July 2008, pp. 1-4.
- [59] K. H. Tseng, Y. F. Shiao. The Analysis of Regenerative Braking Power for Taipei Rapid Transit System Electrical Multiple Units. 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xian, China, 15-17 July 2012, pp. 1947-1951.
- [60] S. S. Joshi, O. Pande, A. Kumar. Regenerative Braking in Metro Rolling Stock. Delhi Metro Rail Corporation, pp. 1-6.
- [61] S. Lee, B. Lee, J. Lee, C. Park, J. Jung, S. Jung. A Study on Regenerative Braking Energy on Electric Multiple Unit Train. 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), Jeju, Korea, October/November 2013, pp. 708-710.
- [62] S. Goh, M. Griffith, K. Larbi. Energy Saving By Using Regenerative Braking As Normal Train Operation. IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010), Birmingham, United Kingdom, 13-15 April 2010, pp. 1-4.
- [63] R. B. M. Tulbure. Models for the AC Locomotives Regenerative Braking, IEEE International Conference on Automation Quality and Testing Robotics (AQTR), 24-25 May, 2012, Cluj-Napoca, Romanian, pp 525-530.
- [64] S. Frey. Railway Electrification System & Engineering. Delhi: White Word Publication, 2012, 145 pp.
- [65] Metrolinx, Electrification System Technology Assessment. Appendix 6. December 2010, 46 pp.
- [66] A. Dong, G. Wu, G. Gao, L. Zhou, W. Wang, B. Wang, Y. Cui, Y. Mingming. Simulation System of Pantograph Arcing. 1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, ICEPE-ST 2011, Xi'an, China, 23-27 October 2011, pp. 637-641.
- [67] C. Song, S. Fei. Three Types of Electromagnetic Noise between Pantograph and Catenary, 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 27-29 October 2009, Beijing, China, 40-43 pp.
- [68] Reaalprojekt OÜ, OÜ Hendrikson&Ko, UAB Kelprojektas, EA Reng AS, *Rail Baltic* 1435 mm trassi Harju, Rapla ja Pärnu maakonnaplaneeringud. [05.08.2013]
- [69] J. Kilter, T. Sarnet, T. Kangro. Modelling of High-Speed Electrical Railway System for Transmission Network Voltage Quality Analysis: *Rail Baltic* Case Study, 9th International Conference Electric Power Quality and Supply Reliability, Rakvere, Estonia, 11-13 June 2014.
- [70] Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele, Projekti III etapi lõpparuanne. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2014, 214 lk.
- [71] Eesti Vabariigi Valitsuse määrus. Võrgueeskiri. [Online] <https://www.riigiteataja.ee/akt/603256>

- [72] C. S. Chen, H. J. Chuang, L. J. Fan. Design of Main Transformer Capacity for Electrified Railway Power Systems. International Conference on Power System Technology proceedings, PowerCon 2000, Vol.1, Perth, WA, Australia, December 2000, pp. 311-316.
- [73] T. Kulworawanichpong. 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>
- [74] L. Battistelli, M. Pagano, D. Proto, A. Amendola, L. Candurro, A. Pignotti. Short Circuit Modelling and Simulation of 2×25 kV High Speed Railways, 2nd Asia International Conference on Modeling & Simulation, AICMS 08, Kuala Lumpur, Malaysia, 13-15 May 2008, pp. 702-707.
- [75] H. Zhengqing, Z. Yuge, I. Shuping, G. Shibin. Modeling and Simulation for Traction Power Supply System of High-Speed Railway. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Wuhan, China, 25-28 March 2011, pp. 1-4.
- [76] R. Cella, G. Giangaspero, A. Mariscotti, A. Montepagano, P. Pozzobon, M. Ruscilli, M. Vanti. 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.
- [77] H. Lai, X. Zhu, J. Yu. Design and Realization of the Economical Operation Monitoring System for Traction Transformers. ICAL '09. IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2009, Shenyang, China, 5-7 August 2009, pp. 409-413.
- [78] I. M. Abdulaziz. Mathematical Modelling and Computer Simulations of Induced Voltage Calculations in AC Electric Traction. PhD Thesis. Edinburg, Napier University, April 2003, 180 pp.
- [79] AS Draka Keila kaabel tootekataloog. 2013, 92 lk.
- [80] Siemens. Product Catalog 2010. Contact line equipment for mass transit and main line railways. 810 pp.
- [81] E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, C. Angeles-Camacho. FACTS Modelling and Simulation in Power Networks. England, John Wiley & Sons Ltd, 2004, 403 pp.
- [82] J. R. Carson. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. The Bell System Technical Journal. Vol.5, 1926, pp. 539-554.

elering
ÜHENDAME ENERGIAD

Kadaka tee 42, 12915 Tallinn
telefon: 715 1222
faks: 715 1200
e-post: info@elering.ee

www.elering.ee

ISBN 978-9949-38-585-0



9 789949 385850