



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

25 kV AC elektriraudtee veduri modelleerimine ja talitluse analüüs

Energiasüsteemide õppetool

Elektroenergeetika õppesuund

Magistritöö

Õppetooli juhataja

prof H. Tammoja

Juhendaja

dots J. Kilter

dokt T. Sarnet

Lõpetaja

J. Vargo

Tallinn 2014

Autorideklaratsioon

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

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Jegor Vargo	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> 25 KV AC ELEKTRIRAUDTEE VEDURI MODELLEERIMINE JA TALITLUSE ANALÜÜS	
<i>Kuupäev:</i> 02.06.2014	122 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Energeetika	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika	
<i>Õppetool:</i> Energiasüsteemid	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Jako Kilter, nooremteadur, doktorant Tanel Sarnet	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i>	
<p>Antud lõputöö eesmärgiks on anda ülevaade 25 kV AC elektriveduri talitlustest tingitud mõjudest elektrisüsteemile erinevate veolajaama konfiguratsioonide korral.</p> <p>Lõputöös antakse ülevaade elektriraudtee ajaloost ning Rail Baltic projekti sisust. Elektriveduri talitus sõltub veduri koostisosadest, seega vaadeldakse põhikomponentide omadusi ja tööpõhimõtteid. Seejärel kirjeldatakse elektrirongide liikumise põhimõtteid ning antakse ülevaade vedurite koormus- ja kiirenduskarakteristikutest.</p> <p>Veduri talitluse modelleerimiseks on koostatud veduri koormuskarakteristik ning veduri mudel <i>PSCAD</i> tarkvaras. Kuna elektrirongi talitluse mõju elektrisüsteemile sõltub veolajaamas kasutatavast trafost, siis tulemuste võrdlemiseks oli modelleeritud kolm juhtumit erinevate trafode puhul. Lõputöös kirjeldatakse modelleerimiseks vajalikke lähteandmete töötlemist ning parameetrite arvutamist. <i>PSCAD</i> mudelis kasutatud põhiblokkide kohta on lisatud kirjeldus ning põhiparameetrite dialoogiaknad.</p> <p>Modelleerimisel oli uuritud elektrisüsteemis pinge muutust, pingeasümmeetria ning koormuse jagunemist faaside vahel erinevate trafode puhul ning võrreldud tulemusi. Modelleerimise tulemuste järgi on ilmne, et elektriveduri talitus mõjutab vaadeldud elektrisüsteemi. Mõju ulatus sõltub elektriraudtee kontaktvõrgu koormuse sümmeetrilisusest ning veolajaamas kasutatavast trafo tüübist.</p> <p>Täiendavalt on lõputöös käsitletud elektrivedurite ajamitest tingitud pingeharmonikute levikut erinevate veolajaama toitetrafode korral.</p> <p>Vastavalt simulatsiooni tulemuste analüüsile ei ole võimalik vaadeldud elektrisüsteemis rakendada veolajaamas ühefaasilisi trafosi. Kontaktvõrgu sümmeetrilise koormuse korral on soovituslik rakendada üldjuhul Scott-ühendusega trafot. Asümmeetrilise koormuse korral on soovituslik paigaldada V-ühendusega trafod.</p> <p>Lõputöö kokkuvõttes antakse ülevaade teostatud tööst ning tuuakse välja lõputöö võimalikud edasi arendamise suunad.</p>	
<i>Märksõnad:</i> Elektriraudtee vedur, 25 kV AC, modelleerimine, kiirenduskarakteristik, pidurduskarakteristik, koormuskarakteristik, pingeasümmeetria, koormuse jagunemine, pingeharmonikud, <i>PSCAD</i>	

Summary of the diploma work

<i>Author:</i>	Jegor Vargo	<i>Kind of the work:</i>	Master's thesis
<i>Title:</i>	MODELLING AND ANALYSIS OF 25 KV AC ELECTRIC LOCOMOTIVE OPERATION		
<i>Date:</i>	02.06.2014		122 pages
<i>University:</i>	Tallinn University of Technology		
<i>Faculty:</i>	Power Engineering		
<i>Department:</i>	Electrical Power Engineering		
<i>Chair:</i>	Power Systems		
<i>Tutor(s) of the work:</i>	associate professor Jako Kilter, PhD student Tanel Sarnet		
<i>Consultant(s):</i>			
<i>Abstract:</i>	<p>The objective of this master's thesis is to provide an overview of modelling and analysis of 25 kV AC locomotive operation and its influence to electrical network in case of different transformers used in traction substation. The first part of this thesis includes an overview of electrical railway history and development of Rail Baltic project.</p> <p>The operation of the electrical locomotive depends on its construction and therefore an overview of its main components and working principles are provided. This is followed by discussion on principles of electric trains, e.g., equation of motion, acceleration and braking characteristic, etc.</p> <p>In order to illustrate the operation of the train a corresponding load curve and locomotive model were developed in <i>PSCAD</i>. For the purpose of analyzing the trains influence to the power system operation in case of different traction substation transformer types separate models including different transformer types were developed and analysed. Thesis includes information about initial data and its applicability for further studies. Overview of <i>PSCAD</i> model components and parameters is given.</p> <p>Modelling and analysis includes voltage profile changes, voltage unbalance analysis and analysis of load distribution between phases in case of different traction supply transformers. Based on the analysis it was determined that the operation of the electric locomotive has an influence to the power system operation and the extent of the influence depends on the electrical traction system load balance and traction supply system transformer type.</p> <p>According to the modelling results it is not possible to use 1-phase traction supply transformer in traction substation in case of observed electrical system model. In case of railway system symmetrical load it is recommended to use Scott type transformers and for asymmetrical load V-type transformers should be used. In addition voltage harmonics analysis is performed and results discussed.</p> <p>Thesis ends with conclusion and recommendations for future work.</p>		
<i>Key words:</i>	Electric railway, electrical locomotive, 25 kV AC, modelling, acceleration characteristic, braking characteristic, load curve, voltage unbalance, load distribution, voltage harmonics, <i>PSCAD</i>		

Sisukord

Lõputöö ülesanne	7
Teema põhjendus:.....	7
Töö eesmärk:.....	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:	7
Lähteandmed:.....	8
Lõputöö konsultandid (vajadusel): -	8
Eessõna	9
Sissejuhatus	10
1. Elektriraudtee Euroopas	12
1.1. Ajalugu	12
1.2. Maailma kiirusrekordid.....	19
1.3. Kontaktvõrgud Euroopas	21
1.4. Rail Balticu projekti sisu.....	25
2. Elektriraudtee vedurid	27
2.1. Vedurite tüübid	27
2.2. Kontaktvõrgu voolusüsteemid	28
2.3. Elektriveduri struktuur	29
2.4. Elektriveduri mootor.....	29
2.5. Elektriveduri muundurid.....	31
2.5.1. Takistitega reguleerimine	32
2.5.2. Diodalaldi	33
2.5.3. AC-DC vedur	35
2.5.4. Türistoralaldi.....	35
2.5.5. Transistorvaheldi	37
2.5.6. AC-AC vedur	39
2.6. Veomootori juhtimissüsteemid	40
2.7. Vedurite klassifikatsioon telgede järgi.....	40
3. Vedurite tunnusjooned	43
3.1. Rongi liikumise arvutusvalemid	43
3.2. Veduri karakteristikud	47
3.2.1. Kiirendus karakteristik.....	47
3.2.2. Pidurduskarakteristik	53
3.2.3. Energiatarbimine.....	59
3.3. Vedurite mudel	63
3.3.1. Täielik veduri mudel.....	64
3.3.2. Lihtsustatud veduri mudel	68
3.4. Vedurite modelleerimine	70
4. Koormusmodelite koostamine PSCAD-is ning käitumine ideaalsetes tingimustes	72
4.1. PSCAD-is koormusmodelite koostamise üldinfo.....	72
4.2. Veduri püsitalitluse koormuskarakteristiku koostamine.....	73
4.3. Regeneratiivse pidurdamisega koormuskarakteristiku koostamine	75
4.4. PSCAD-i mudeli parameetrite arvutus.....	77
4.5. Veduri püsitalitluse mudeli koostamine PSCAD-is	77
4.6. Regeneratiivse pidurduskarakteristikuga PSCAD mudeli koostamine	81
4.7. Modelleerimise käigus juhitava mudeli kirjeldus	82
4.8. Koostatud vedurite mudelite talitus ideaaltingimustel.....	84
4.9. PSCAD-i mudelis kõrgemate harmoonikute modelleerimine	86

5. Elektrirongi mudeli talitluse mõjude analüüsimine elektrisüsteemis.....	89
5.1. Elektrisüsteemi, trafode ning elektrirongi mudelid	89
5.2. Rongide arv ja nende koormusgraafik	91
5.3. Modelleerimise tulemused.....	93
5.3.1. Elektrisüsteemi pinge muutus.....	93
5.3.2. Elektrisüsteemi koormuste jagunemine faaside vahel	97
5.3.3. Elektrisüsteemi pingeasümmeetria modelleerimise tulemused	102
5.4. Tulemuste võrdlus ja analüüs	104
5.5. Pinge kõrgemate harmoonikute modelleerimine ning analüüs.....	105
Kokkuvõte	110
Kirjandus.....	112
L.1. Pidurdamise mudeli aktiivtakistuse andmefail.....	121
L.2. PSCAD-i mudel kahe rongi talitluse mõju analüüsimisel.....	122

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	25 kV AC elektriraudtee veduri modelleerimine ja talitluse analüüs
Üliõpilane:	Jegor Vargo, 131745
Lõputöö juhendaja:	dots Jako Kilter, dokt Tanel Sarnet
Õppetool:	Energiasüsteemid
Õppetooli juhataja:	prof Heiki Tammoja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	02.06.2014

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Seoses Rail Balticu projekti aktuaalsusega on oluline prognoosida 25 kV AC elektriraudtee süsteemi mõju Eesti elektrisüsteemi talitlusele. Käesolevas töös käsitletakse 25 kV AC süsteemis kasutatavate vedurite lihtsustatud püsitalitlus mudelite koostamist *PSCAD* tarkvaras. Koostavad mudelid on kergemini käsitletavad analüüside teostamiseks ning oma olemuselt universaalsemad kui detailsed mudelid.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on koostada 25 kV AC süsteemi elektriveduri, karakteristikute põhiselt juhitavad, lihtsustatud matemaatilised koormusmudelid *PSCAD* tarkvaras.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Uurida maailmas kasutusel olevate vedurite tüüpe ning nende kiirendus- ja koormuskarakteristikud sealhulgas regeneratiivsel pidurduskarakteristikud. Kogutud materjali põhjal koostada üldistatud veduri karakteristikud ning välja töötada meetoodika nende modelleerimiseks *PSCAD* tarkvaras. Uurida vedurite ajamate lihtsustatud modelleerimise kujusid ning analüüsida nende rakendatavust *PSCAD* mudelite koostamisel. Analüüsi tulemuste põhjal valida välja sobiv veduri representatsioon ning koostada selle mudel *PSCAD*-is. Koostatud veduri modelleerimisel Eesti ekvivalentses elektrisüsteemis analüüsida elektriraudtee koormuse mõju elektrisüsteemi talitlusele.

Lähteandmed:

Veduri karakteristikute ja mudeli koostamisel lähtutakse kirjandus allikatest: raamatud, teadusartiklid jne. Täiendavad lähteandmed modelleerimiseks ning veduri talitluse hindamiseks esitab juhendaja.

Lõputöö konsultandid (vajadusel): -

Eessõna

Lõputöö teema valikul on pööratud tähelepanu teema aktuaalsusele tänapäeval ning teema võimalikule arengule tulevikus. Lõputöö tulemused on kasutatavad eelkõige Eesti elektrisüsteemis, vajadusel ka riikides, kus on planeeritud rajada raudtee Rail Balticu projekti mahus. Teema aktuaalsus on tingitud Rail Balticu projekti raames planeeritavast elektrikiirraudteest. Võttes arvesse, et Eesti elektrisüsteem on suhteliselt väike, võib elektriraudtee talitus mõjutada elektrisüsteemi kvaliteedi näitajaid. Seega enne planeeritava raudteevõrgu ühendamist Eesti elektrisüsteemiga tuleb analüüsida planeeritava raudteevõrgu mõju Eesti elektrivõrgule ning vajaduse korral näha ette meetmed negatiivsete mõjude minimiseerimiseks.

Autor soovib tänada juhendajaid Jako Kilterit ning Tanel Sarnetit võimaluse eest osaleda Eesti suurima elektriraudtee projektis, samuti Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituuti, kes võimaldas kasutada elektrivõrgu modelleerimiseks tarkvara *PSCAD*.

Jegor Vargo

jevargo@gmail.com

+372 5812 6245

Sissejuhatus

Lõputöö eesmärgiks on koostada 25 kV AC süsteemi elektriveduri kirjanduslikel allikatel põhinev koormusmudel, modelleerimiseks sobiv veduri mudel, modelleerida elektriveduri talitlust ekvivalentses elektrisüsteemis ning analüüsida elektriveduri talitlusest tingitud mõju elektrisüsteemile.

Lõputöö teema on aktuaalne Rail Balticu projekti raames, kuna planeeritav elektriraudtee on plaanis rajada lähiaastatel ning enne elektriraudtee liitumist Eesti elektrisüsteemiga on vajalik teostada vastavad uuringud, määramaks elektrirongide talitluse mõju ning analüüsida selle tagajärgi olemasolevatele tarbijatele.

Elektriraudtee on eripärane elektrienergia tarbija, kuna elektrivedur on suhteliselt suur, muutuv ning samal ajal ühefaasiline koormus. Elektriraudtee ühendatakse elektrisüsteemiga veolajaamades, kuhu tavaliselt paigaldatakse pinget alandavad trafod. Kuna elektrivedur on ühefaasiline koormus, siis sõltub trafo-ühendusest kuidas elektrirongi koormus on jaotatud elektrisüsteemi faaside vahel. Seega sõltub trafo tüübist koormuste jagunemine, elektrisüsteemi pinge muutus ning pingeasümmeetria. Veolajaamades kasutatakse laialdaselt, nii ühefaasilisi trafosid, kui ka eritrafosid, kus kolmest faasist konverteeritakse kaks ühefaasilist vooluringi, millele ühendatakse kaks kontaktvõrku.

Elektriraudtee mõju analüüsimiseks tuleb seega koostada elektriveduri ja põhiliste veolajaamas kasutatavate trafode mudelid, mille põhjal on võimalik analüüsida erinevate trafo puhul elektrirongi talitluse mõju elektrisüsteemile, ning teha vastavad järeldused.

Käesolevaks hetkeks ei ole Rail Balticu projekti raames valitud elektriveduri tootjat ega määratud veduri täpseid tehnilisi parameetreid. On teatud veduri orienteeruv nimivõimsus ning kontaktvõrgu nimipinge. Lähteandmete puudumisel uuritakse käesolevas töös, veduri mudeli koostamiseks, maailmas kasutusel olevate vedurite tüüpe ning nende karakteristikud. Kogutud materjali põhjal koostatakse üldistatud veduri karakteristik, mille alusel koostatakse veduri mudel *PSCAD* tarkvaras. Koostatavad mudelid peavad olema kergemini käsitletavad analüüsides teostamiseks ning oma olemuselt universaalsemad, et võimaldada tulevikus sama mudeli kasutamisel modelleerida täpsustatud parameetritega vedurit.

Eraldi teema elektriraudtee analüüsimisel on regeneratiivne pidurdamine. Ühelt poolt suurendab see vedurite energiakasutamise efektiivsust, aga teisalt tuleb põhjalikult uurida asümmeetriliselt genereeritud energia mõju elektrisüsteemile ning teisi võimalike negatiivseid mõjusid, mis regeneratiivse pidurdamisega kaasnevad.

Antud töö koosneb teoreetilisest ning praktilisest osast. Teoreetilises osas on esitatud ülevaade elektriraudtee veduritest, vedurite põhilistest komponentidest, vedurite karakteristikutest ning modelleerimisest. Praktilises osas on koostatud modelleerimiseks sobiv elektriveduri koormusgraafik ning selle järgi koostatud veduri mudel tarkvaras *PSCAD*. Elektriveduri mudeli talitus oli modelleeritud ideaalsetes tingimustes ning ühendatuna ekvivalentse elektrisüsteemiga. Modelleerimisel elektrivedur oli ühendatud ekvivalentse elektrisüsteemiga kolme eri tüüpi trafo kaudu. Need olid ühefaasiline trafo, V-ühendusega trafo ning Scott-ühendusega trafo. Modelleerimisel oli saadud vajalikud lähteandmed elektrirongi talitluse mõju analüüsimiseks elektrisüsteemile. Veduri ja rongi parameetrid ning talitluse lähteandmed on saadud kirjanduslikest allikatest. Ekvivalentse elektrisüsteemi, ning veolajaamades kasutatava trafo tüübi parameetrid on ette antud lõputöö juhendaja poolt. Praktilises osas kasutatakse elektrivõrgu modelleerimiseks tarkvara *PSCAD*, mida oli võimalik kasutada Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika instituudi arvutiklassis.

Lõputöö põhiosa koosneb viiest peatükist. Lõputöö esimeses peatükis antakse ülevaade elektriraudtee ajaloost, tänapäeva elektriraudtee seisundist Euroopas ning Rail Balticu projekti sisust. Teises peatükis on põhjalikult käsitletud elektriraudtee vedurite struktuuri ning põhiosasid. Suurt tähelepanu on pööratud elektriveduri mootoritele ning elektrienergia muunduritele. Samas peatükis on toodud vedurites kasutatavate muundurite põhjalik iseloomustus, koos muundurite karakteristikutega. Kolmandas peatükis kirjeldatakse rongi liikumise arvutusvalemeid ning vedurite karakteristikud, milledest põhilised on kiirendus- ning pidurduskarakteristikud. Neljandas peatükis on esitatud veduri modelleerimiseks koormuskarakteristiku koostamise käik ning veduri mudeli koostamine *PSCAD* tarkvaras. Neljanda peatüki lõpus modelleeritakse elektrivedur ideaalsetes tingimustes. Viiendas peatükis on kirjeldatud elektriveduri modelleerimise käiku, saadud tulemusi ning on toodud mõjude analüüs elektrisüsteemile erinevate trafo-ühenduste puhul.

1. Elektriraudtee Euroopas

Käesolevas peatükis on toodud lühidalt ajalooline ülevaade, tänapäevane elektriraudtee lahendustest Euroopas ning Rail Balticu projektist. Peatükis 1.1 antakse lühidalt ülevaade esimesest elektriraudteest kuni kaasaegsete kiirrongideni ning maailma kiirusrekordid. Peatükis 1.2 antakse tänapäevane detailne ülevaade Euroopa elektriraudtee võrkudest. Peatükk 1.3 kajastab Rail Balticu projekti põhieesmärke ning ülevaadet.

1.1. Ajalugu

Antud peatükis vaadeldakse elektriraudtee vedurite ajalugu esimesest vedurist kuni tänapäeva kiirrongi veduriteni. Raudtee ajalugu algas 1800-ndatel aastatel. Esimese veojõu allikana kasutati aurumasinat. Peale diisel- ja elektrivedurite leiutamist, olid aurumasinad kasutusest välja jäänud madalama kasuteguri tõttu. [1]

Allpool vaadatakse elektriraudtee olulisemaid ajaloolise arengu etappe. Elektriraudtee vedurid hakkasid ilmuma 19. sajandi lõpus, kuna elektrimootorite tootjad tahtsid leida oma toodetele uut kasutamise valdkonda. Samuti mõjutas elektrivedurite arendamist kivisöe ressursi puuudujääk, mis oli eriti märkimisväärne esimese maailmasõja ajal. Elektrivedurite kasutuselevõtt oli samuti mõjutatud vajadusega suurtes linnades suure hulga reisijate veoga. Elektritransport oli eelistatud, kuna võrreldes teiste veojõu allikatega vähendab see keskkonna saastamist. [1]

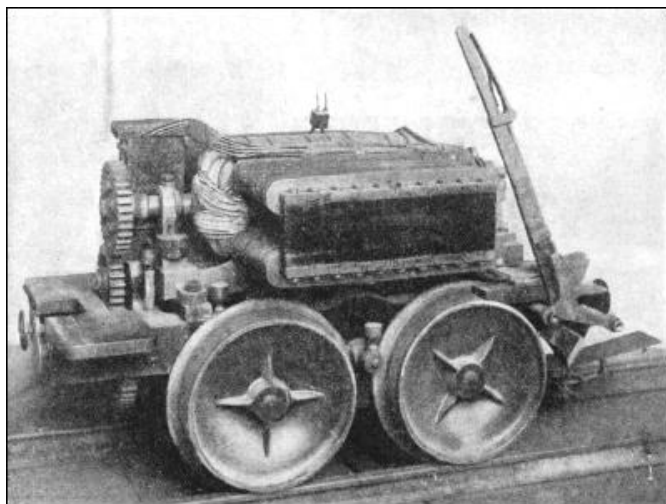
Esimene elektriraudtee näidis oli esitatud aastal 1879 Berliini näitusel. Esitatud elektriraudtee oli 300 meetri pikk ning rong oli ette nähtud 18 reisija jaoks. Rongi maksimaalne kiirus täiskoormatult oli 7 km/h. Veduri toitepinge oli 150 V_{DC} ja võimsus oli 2,2 kW. [1]

Esimese elektrirongi ja reisijate foto on esitatud allpool joonisel 1.1.



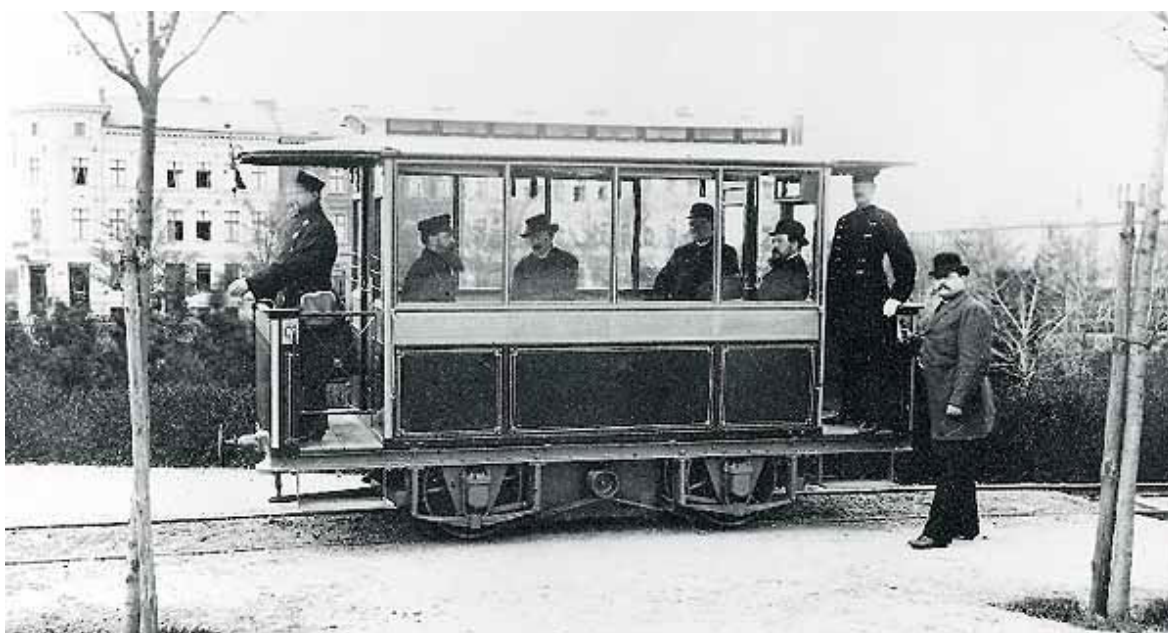
Joonis 1.1 Esimene elektriraudtee katserong, Berliin 1879 a. [2]

Esimese elektrirongi insener oli Werner von Siemens. Rong koosnes vedurist ning kolmest vankrist. Vedur sai elektritoite kolmanda rööpa kaudu, mis oli paigaldatud kahe rööpa vahele, mille peal sõitis rong ning mida samaaegselt kasutati tagasivoolujuhina.[3] Esimese raudtee elektriveduri foto on esitatud allpool joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Esimene elektriraudtee vedur, Berliin 1879 a. [2]

Siemens tahtis ehitada Berliini keskuses esimese regulaarse teenindusega tramliini, et näidata elektriveduri sobivust igapäevaseks kasutamiseks. Kahjuks Berliini linnavalitsus ei lubanud ehitada elektriraudteed enda konservatiivsuse tõttu. Seega Siemens & Halske AG ehitasid aastal 1881 esimest tramliini Berliinist lõuna pool Lichterfelde eeslinnas. Tramm koosnes ühest kaheteljelisest vagunist, kuhu oli paigaldatud nii alalisvoolu mootor kui ka 16 istekohta (vt. joonis 1.3).



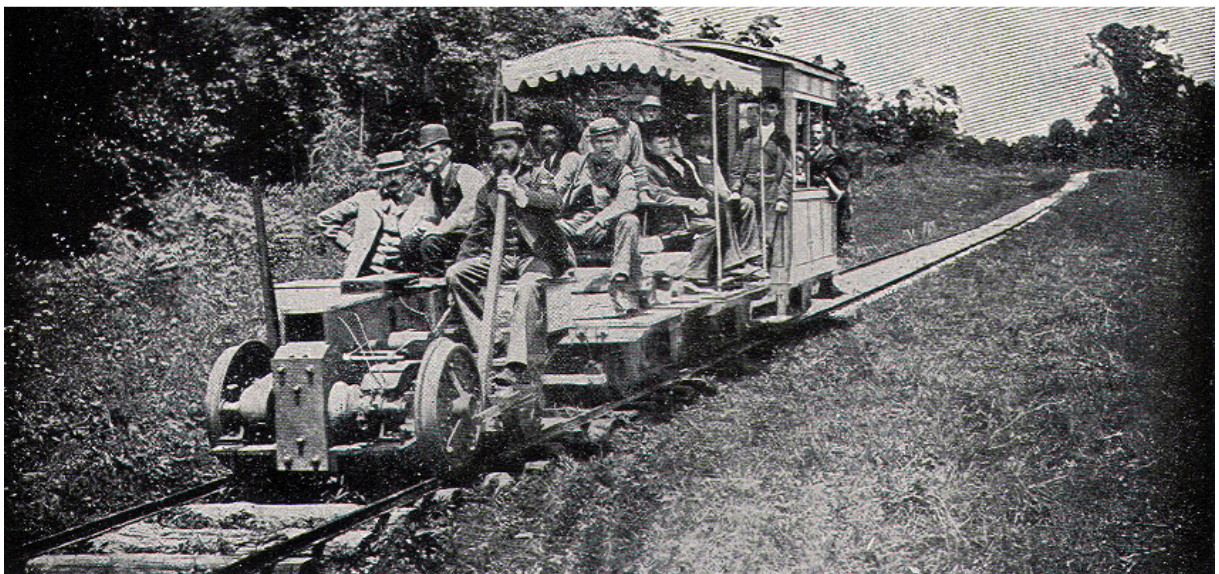
Joonis 1.3 Esimene regulaarse teenindusega tramliin, Lichterfelde (Saksamaa) 1881 a. [4]

Vagun oli ettenähtud maksimaalselt 50 reisijate jaoks. Esimese trammiliini nimipinge oli 180 V_{DC} ning maksimaalkiirus oli 20 km/h ning vedur sai elektritoite rööbaste kaudu. 12 mail 1881 aastal oli trammiliin ametlikult testitud ning vastu võetud. Regulaarne teenindus algas 16 mail 1881 aastal. Järgmistel aastakümnetel Siemensi firma ehitas ning pani tööle vaid mõned trammid, ajani millal Siemensi insener Walter Reichel lahendas vooluvõturi (*bow collector*) põhja konstruktiivse puuduse. [4]

Praktiliselt samal ajal teostati esimesi katsetusi elektriveduritega Vene Impeeriumis ja Ameerika Ühendriikides.

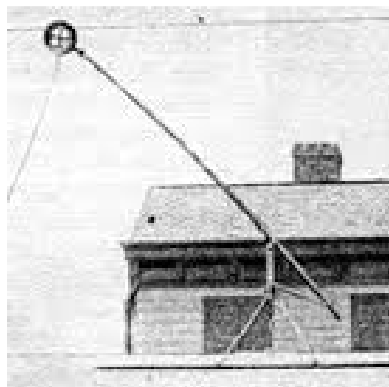
1875 aastal alustas Fyodor Pirotsky Peterburis katsetusi elektriraudteega, kus ta kasutas tavalisi raudteerööpaid elektrienergia ülekandmiseks. Ühte rööbast kasutati edasivoolujuhina elektrienergia ülekandmiseks elektrimootoris ning teist rööbast tagasivoolujuhina toiteallikasse. Rööpad olid maast isoleeritud kasutades asfaltija rauatagi, seejuures olid liipri ning rööbaste jätkud omavahel elektriliselt kokkuühendatud. Aastal 1880 katsetas Fyodor Pirotsky esimest trammi Peterburis hoburaudteel. Trammina kasutati hoburaudtee vagunit, millele oli monteeritud alalisvoolu mootor. [3]

Ameerika ühendriikides teostas elektriraudteega katsetusi Toomas Edison. 1880 aastal katsetas tema elektriveduri prototüüpi raudteel, New Yorgi osariigis [3]. Tema elektriveduri võimsus oli 12 hobujõudu. Allpool joonisel 1.4 on esitatud selle elektriveduri foto koos vaguniga. Aastal 1882 tema ehitas ca 5 km pikkuse elektriraudtee, kus oli kasutusel kaks erinevat vedurit. Üks reisijate transportimiseks, teine kauba transportimiseks. Reisirongi vedur oli kiire ning maksimaalne reisijate arv oli 90 inimest. Kaubaveduril oli väiksem maksimaalne kiirus, aga ta suutis vedada raskemaid kaupu. [5]



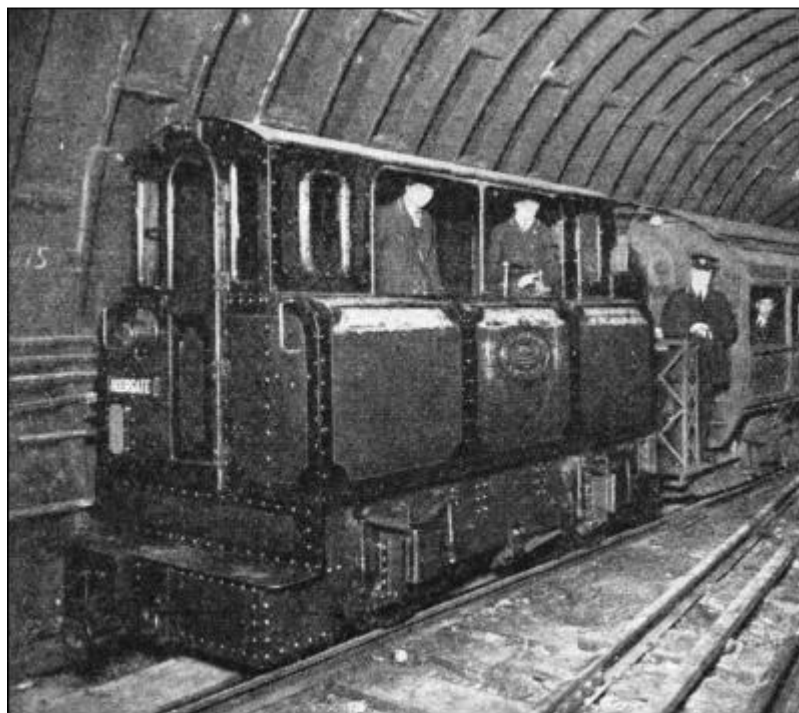
Joonis 1.4 Toomas Edison katseline elektrirong, New York osariik 1880 a. [5]

Elektrifitseeritud raudteerööpad olid elektriohutuse seisukohast ohtlikud, mis tõttu tekkis vajadus töötada välja uudne ohutum toitesüsteem. Sellega tegeles Saksamaal W. Siemens ning Ameerika ühendriikides Van Depoele.[3] Oli proovitud mõningaid õhuliiniga ühendus mehhanisme. Edukaks oli tunnistati 1885 aastal Torontos katsetatud, Kanada Van Depoele ühendusviis, kus elektriühendus teostatakse õhuliini alumise poolega kasutades "trolley pole" (vt. joonis 1.5). Pakutud õhuliinivõrk sai universaalseks süsteemiks, mida tänapäeval nimetatakse pantograafiks. [6]



Joonis 1.5 Elektrirongi ühendus kontaktvõrgu alumise poolega [7]

Järgmine samm oli ehitada maaalune elektriraudtee. Esimene metroo avati Londonis aastal 1890. Esimese metroo tunneli läbimõõt oli ca 3,1 m. [2] Allpool joonisel 1.6 on toodud esimese metroo pilt.



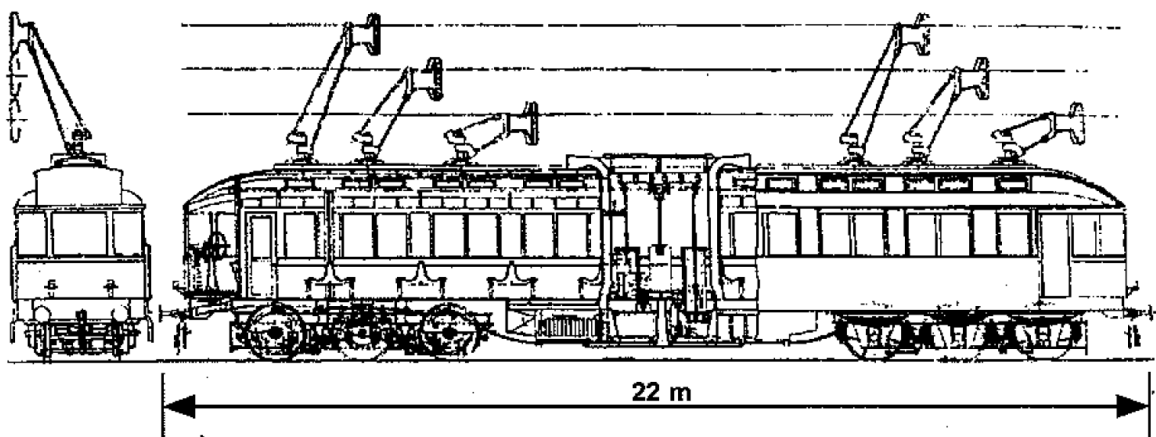
Joonis 1.6 Maailma esimene metroo, London 1890 a. [2]

Kõikides ülalpool kirjeldatud elektriraudteedes oli kasutatud alalisvoolu elektrivõrku ning mootoreid. Esimesed ühiskondlikud elektriraudteed olid arenenud suurtes linnades, kus oli vajadus suurte inimeste hulkade transportimiseks. Need oli trammiinid ning metroo.

- **3-faasiline AC võrk**

1890-ndatel aastatel oli selge, et elektriraudtee jaoks omab AC elektrivõrk eelised võrreldes DC võrguga, nimelt lubab edastada suuremat energia võimsust pikema vahemaa taha [8]. Esimene 3-faasiline vahelduvvooluga elektriraudtee ehitati Šveitsis aastal 1899 [1]. Esimestes kolmefaasilistes elektriraudteedel Šveitsis ja Itaalias kasutati vastavalt 750 V 40 Hz ning 3 kV 15 Hz toitesüsteeme [1], [9].

Edasised uuringud olid suunatud elektrirongi kiiruse suurendamiseks, mis õnnestus aastal 1903 Saksamaal, kus raudteevagun saavutas kiiruse 213 km/h. Antud maailmarekord jäi püsima 1950 aastateni. Allpool joonisel 1.7 on esitatud kolmefaasilise elektrivarustusega raudteevagur, mis saavutas Saksamaal kiiruse 213 km/h aastal 1903.[1]



Joonis 1.7 3-faasiline raudteevagur, mis saavutas Saksamaal kiiruse 213 km/h 1903 a. [1]

- **1-faasiline madalsageduslik AC võrk**

Kolmefaasilise vahelduvvooluga kontaktvõrgu kasutamine näitas, et antud kontaktvõrgu süsteem omab rida olulisi puudusi, mis on seotud kolmefaasilise õhuliini kontaktvõrgu keerulise ehitusega ning mootori kiiruse juhtimise probleemiga. Seega kolmefaasilise vahelduvvoolu võrgu asemel oli otsustatud rajada ühefaasiline vahelduvvooluga elektriraudtee, mis tehniliselt vajab ainult ühte õhuliini juhet. Sellel juhul probleem seisnes piisava suure võimsusega mootori ehitamisel. Aastal 1905 ehitati Šveitsis esimene ühefaasiline vahelduvvoolumootoriga elektriraudtee. Hiljem 1900-ndatel aastatel olid teistes riikides elektrifitseeritud elektriraudteed ühefaasilise vahelduvpingega erinevate nimipingete ja võrgusagedusega: 6,3 kV 25 Hz (Berlin);

10 kV 15 Hz (Preisimaa); 12 kV $16^{2/3}$ Hz (Prantsusmaa). Esimese maailmasõja ajal Kesk-Euroopa ja Skandinaavia otsustati kasutada 15 kV $16^{2/3}$ Hz võrku, kuna varem oli tehtud madalsageduslikuga toitevõrguga edukaid katsetusi Šveitsis ning Rootsis. [1]

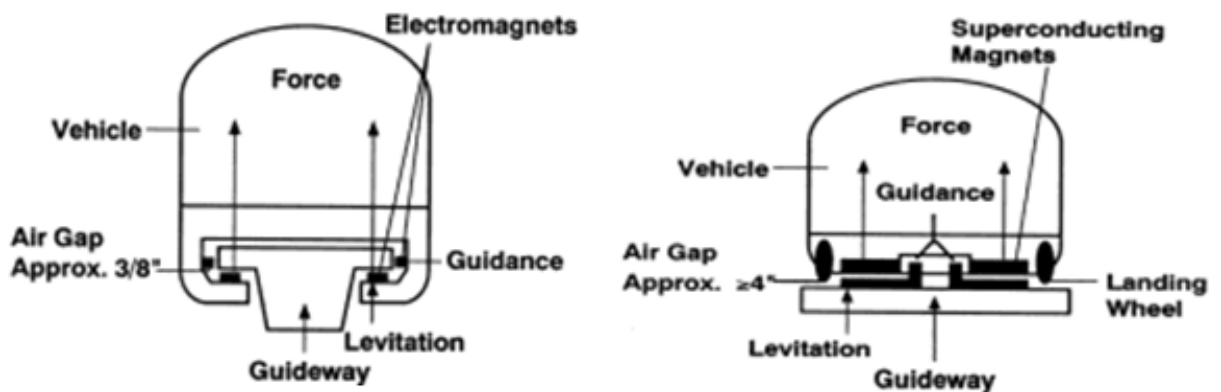
- **1-faasiline 50 ja 60 Hz AC võrk**

Esimene ühefaasiline 50 Hz, 16 kV elektriraudtee võrk oli esitletud Ungaris 1920-ndatel aastatel. Saksamaal tehti katsetusi aastatel 1933-1960 50 Hz 20 kV kontaktvõrguga, kus katsetati erinevad veojõumasinaid: vedurid elavhõbekaarlahenduse alaldiga, DC mootorid, kommutaatormootorid. 1951 aastal Prantsusmaal ehitati 20 kV 50 Hz raudteevõrk, mille head tulemused põhjustasid laia kasutusele võtmist 25 kV 50 Hz võrgu Prantsusmaal. Aastal 1958 võttis vastu samuti enda jaoks 25 kV 50 Hz raudteevõrgu standardi Suurbritannia. [1]

- **Magnethõljukrongid (*Maglev*)**

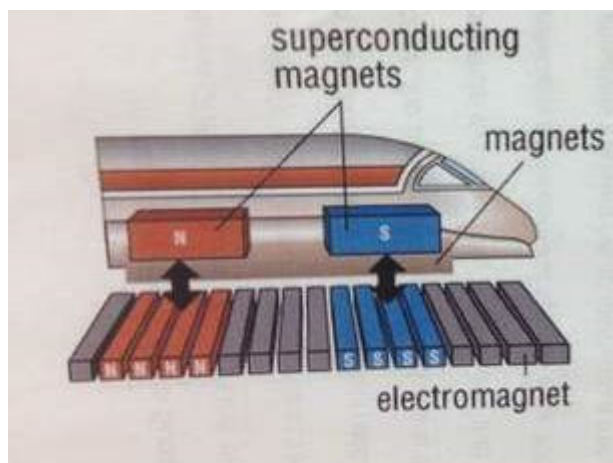
Järgmine elektritranspordi arendamise samm on magnethõljukrongid (*Magnetic Levitation*). Need ei ole tavalised raudteerongid, kuna antud transpordivahendil puuduvad rattad ning seega ka rööpad. Sõiduk hoitakse õhus 8...12 mm kõrgusel teepinna kohal ning liigutakse elektromagnetvälja tekitatud jõu mõjul. [10][11]

Allpool joonisel 1.8 on näidatud magnethõlkuri kahe levinuma juhtteede tüübi ehitus.



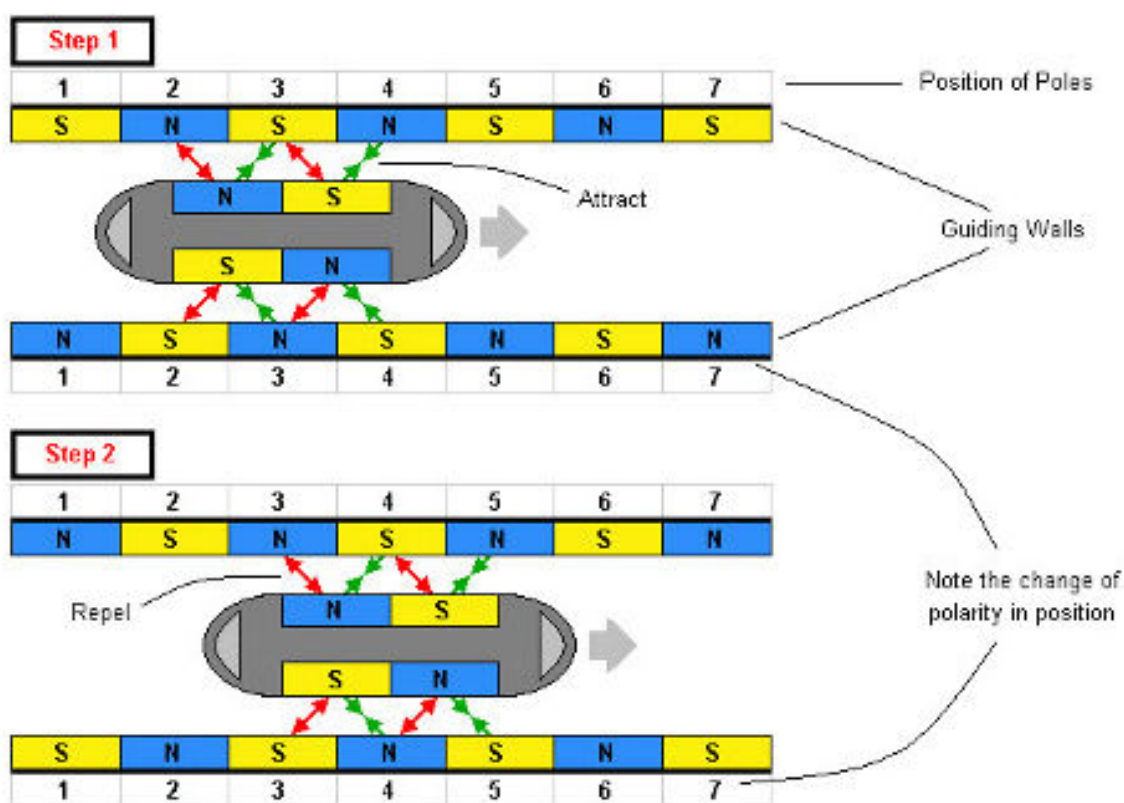
Joonis 1.8 Magnethõlkuri kahe juhttee skeem. [12]

Magnetväljade vastastikust tõmbavat ja tõukavat toimet kasutatakse selleks, et hoida rongi õhus, kui ka liikumiseks. Allpool joonisel 1.9 on näidatud kuidas hoitakse rong õhus.



Joonis 1.9 Magnethõlkuri õhus hoidmise tööpõhimõte [13]

Allpool joonisel 1.10 on näidatud magnethõlkuri liikumise põhimõtteline skeem. Juhtteede elektromagnetide polaarsuse muutumisel suunatakse rongi soovitud suunas.



Joonis 1.10 Magnethõlkuri liikumise tööpõhimõte [14]

Aastal 1922 hakkas Saksamaal Hermann Kemper uurima magnethõlju efekti ning aastal 1934 sai patendi magnethõlju tehnoloogia eest. 30 aastat ei arendatud seda tehnoloogiat edasi. Aastal 1968 alustati selle tehnoloogia edasi arendamist transpordisuunas. Aastal 1971 katsetati esimest magnethõlju transpordivahendi prototüüpi Thyssen Henschel, Saksamaal, kus paigaldati

linearmootor transpordivahendile. Aastal 1975 katsetati Saksamaal uut mudelit, kus oli kasutatud moderniseeritud linearmootorit koos suunajaga "guideway". Samas kohas katsetati aastal 1975 edukalt magnethõljukrongi reisijate transportimiseks. Aastal 1979 demonstreeriti 900 meetrilist katseteed näitusel Hamburgis. Magnethõljukrong saavutas kiiruse 75 km/h. Peale seda näitust tekkis laialdane huvi magnethõlju tehnoloogia vastu ning järgnevatel aastatel tehti uued katsetused pikematel trassidel, kus saavutati suuremaid kiirusi. Aastal 1993 saavutati magnethõljukrongi kiirusrekord 450 km/h. Aastal 1991 tõestati Saksamaal, et antud transpordiviis on tehniliselt valmis kasutamiseks. Aastaks 2005 oli planeeritud ehitada Saksamaal 292 kilomeetrline tee magnethõljukrongi jaoks, kuid aastal 2000 see projekt peatati negatiivsete tasuvusuuringute tõttu. Samal aastal otsustas Hiina teha tasuvusuuringu koostöös Saksa firmaga, ning otsustas ehitada magnethõljukrongi liini Šanghais. Aastal 2002 see liin oli valmis ning katsetatud Hiina ning Saksa ekspertide poolt. See on käesolevaks hetkeks ainsaks magnethõljukrongi kommerts liiniks (vt. joonis 1.11) maailmas. Rongi kiirus oli 430 km/h. [11]



Joonis 1.11 Regulaarsel reisijateveol magnethõljukrong Shanghai Maglev, Hiina [10]

Teine riik, kes saavutas häid tulemusi magnethõljukrongidega on Jaapan. Jaapan hakkas tegelema magnethõljukrongidega aastal 1962 peale ülijuhtivate magnetite tehnoloogia arendamist. Aastal 1972 oli katsetatud Jaapanis ülijuhtiv magnethõljuk, transpordivahend, mis saavutas kiirust 60 km/h. Järgmistel aastatel oli tehtud mitu katsetust kiiruse tõstmisega, kus aastal 1994 oli saavutatud maksimaalne kiirus 431 km/h mehitamata juhtimisega, ning 411 km/h mehitatud juhtimisega [11]. Lisa infot magnethõlkuri kohta on võimalik leida raamatus: [15].

1.2. Maailma kiirusrekordid

Esmalt esitatakse käesolevas osas regulaarsel reisijateveol kasutatavate rongide kiiruserekordid mida kasutatakse regulaarsel reisijateveol ning seejärel absoluutseid rekordeid konkreetsete veduritega.

Kõige kiirem regulaarsel reisijateveol elektrirong on Shanghai Maglev (Hiina magnethõlkur, mis oli näidatud ülespool joonisel 1.11), mille maksimaalne töökiirus on 430 km/h ning keskmine kiirus 251 km/h. Shanghai Maglev oli võetud regulaarsele kasutusele 2004 aastal. [16]

Kõige kiirem elektriraudteerong on CRH 380A, Hiina, mille maksimaalne eksploatatsiooni kiirus on 380 km/h ning maksimaalne kiirus 486,1 km/h. CRH 380A oli võetud regulaarsele kasutusele 2010 aastal [16]. Rong saab toide 25 kV AC kontaktvõrgust ning saab transportida 494 reisijat [17]. Elektriraudteerongi CRH 380A foto on esitatud joonisel 1.12.



Joonis 1.12 Regulaarsel reisijateveol kiireim elektriraudteerong CRH 380A, Hiina. [17]

Edasi on toodud rongide kiiruserekordid, mis ei ole kasutusel regulaarsel reisijateveol, ning mis olid konstrueeritud kiiruserekordi püstitamiseks.



Joonis 1.13 Maailmas kiireim elektrirong (581km/h) Maglev, Hiina 2003 aasta. [18]

Elektrirongi maailma rekord on 581 km/h, mille saavutas uuendatud Maglev, Jaapanis aastal 2003 [19]. Magnethõlkuri foto on toodud ülalpool joonisel 1.13.

Klassikalise elektriraudteerongi maailma rekord on 574,8 km/h, mille saavutas TGV, Prantsusmaal aastal 2007. Maailma kiirusrekordi saavutamiseks kasutati muudetud regulaarset reisirongi: rong oli lühendatud, kasutati suurendatud võimsusega mootoreid ning suuremaid rattaid [20]. Samuti maailma rekordi saavutamiseks oli kontaktvõrgu AC nimipinge tõstetud 25 kV-lt 31 kV-ni [21]. Maailma rekordi saavutanud rongi TGV foto on näidatud joonisel 1.14.



Joonis 1.14 Maailmas kiireim elektriraudteerong (574,8 km/h) TGV, Prantsusmaa 2007 a.

[22]

Lisa informatsioon Euroopa ja maailma raudtee projektide kohta on võimalik leida Railway-Technology koduleheküljel: [23].

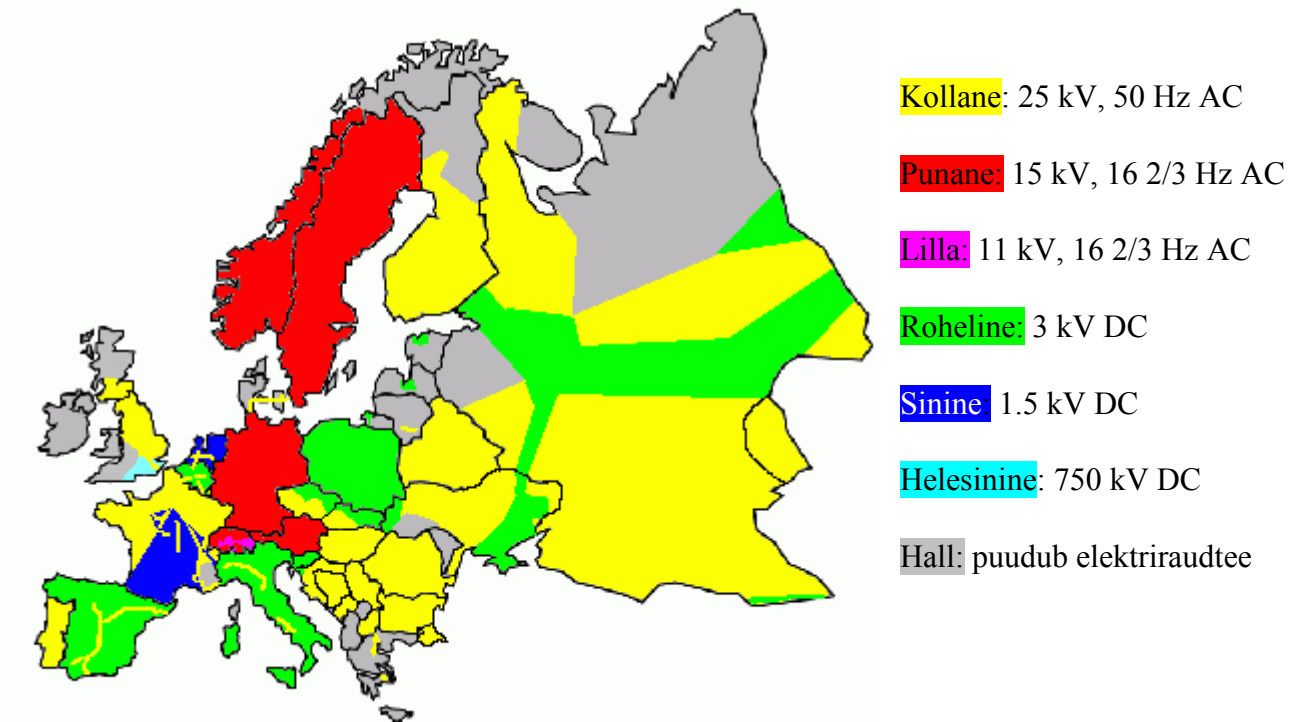
1.3. Kontaktvõrgud Euroopas

Esimene regulaarseks reisijateveoks ettenähtud elektriraudtee avati 1881. aastal. Peale seda algas elektriraudtee areng ning raudteevõrkude elektrifitseerimine. Praeguseks hetkeks on ainult 14% maailma raudteevõrgust elektrifitseeritud. Ülejäänud 86% raudteevõrkudes kasutatakse diiselveureid. [1]

Nii et 1900-ndatel aastatel ei olnud ette nähtud rajada riikidevahelisi raudteesüsteeme, puudus koostöö riikide vahel, iga riik proovis leida enda jaoks kõige parema variandi. Tänu sellele

ajaloolisele arengule Euroopas on praegu kasutusel mitu erinevat nii vahelduv- kui ka alalisvoolu kontaktvõrgu süsteemi. Allpool joonisel 1.15 on toodud Euroopa elektriraudtee kontaktvõrkude toitesüsteemide kaart. Teistest allikatest nt. [1], [24], [25] võib leida täiendavaid kaarte.

Balti riikide raudtee kohta on toodud põhjalik ülevaade Rail Baltica teostatavus uuringus [26].



Joonis 1.15. Elektriraudtee kontaktvõrkude süsteemid Euroopas [27]

Jooniselt on näha, et Euroopa riigid kasutavad erinevad kontaktvõrgu nimipingeid ning sagedusi. Rootsi, Norra, Saksamaa, Šveits ja Austria kasutavad 15 kV AC 16 ²/₃ Hz. Hispaania (enamus osa), Itaalia, Poola, Balti riigid ning osaliselt Venemaa kasutavad 3,0 kV DC. Üksikud väikeriigid kasutavad 1,5 ja 1,2 kV DC. Ülejäänud riigid kasutavad 25 kV AC 50 Hz. [1]

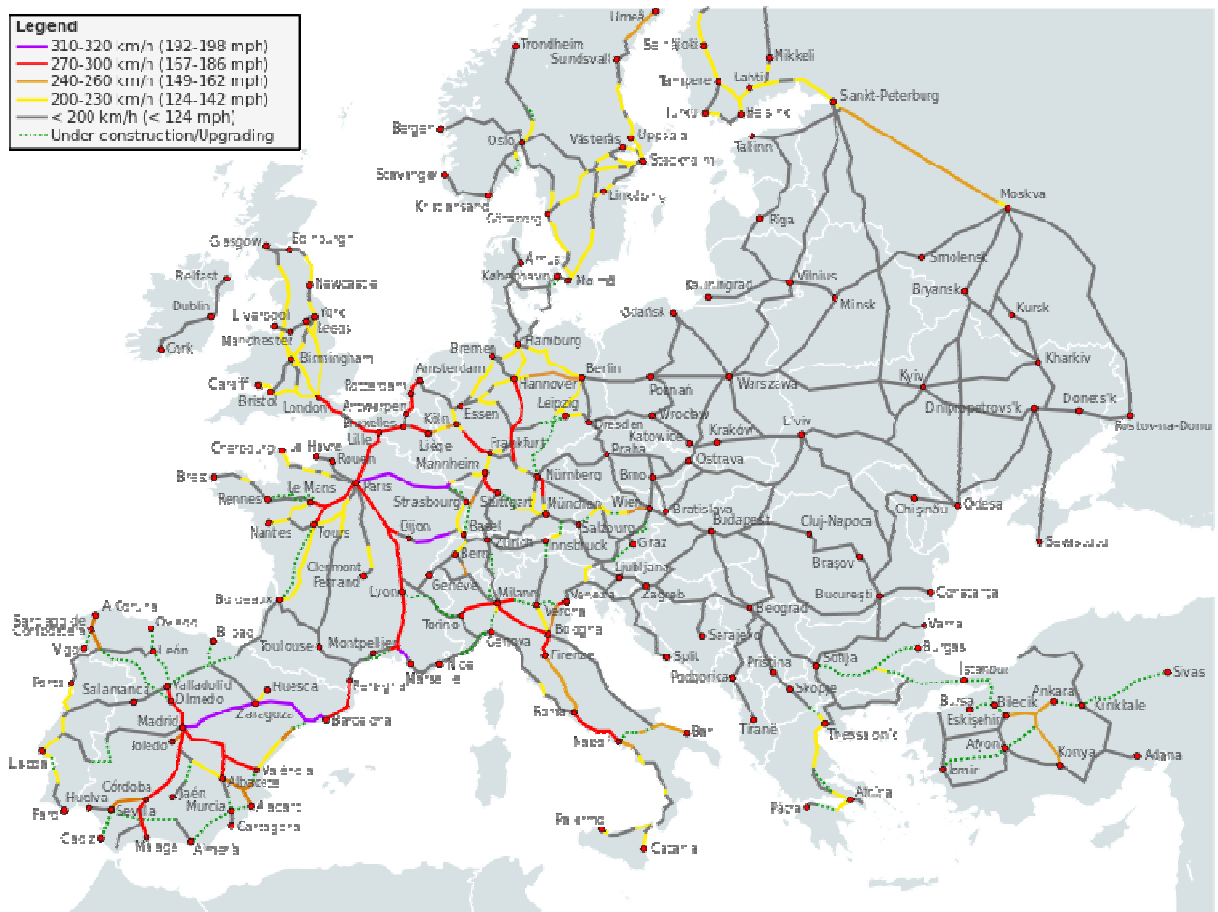
Tänapäeval elektrivedurid, millel on ettenähtud teha üleriigilisi reise erinevate kontaktvõrkude nimipingega, varustatakse seadmetega, mis võimaldavad talitleda kahe või enama pingesüsteemiga. [1]

Vaadates elektrienergia ülekandmise seisukohast on vahelduvvoolu süsteem parem, kuna võrreldes alalisvooluga sama energia ülekandmiseks kõrgematel pingetel võib kasutada väiksema ristlõikega juhet. DC kontaktvõrgud raskete, suure läbimõdduga juhtmete asemel ehitatakse lisa rööpaga. DC võrk samuti vajab rohkem (kuni 8 korda) alajaamu, kui AC võrk. [28]. Seejuures on väljakujunenud reegel, et vahelduvpinget kasutatakse pikematel vahekaugustel, näiteks kaugveod, aga alalispinget kasutatakse väikestel vahekaugustel, näiteks metroodes ja linnalähiliinidel. DC kontaktvõrke kasutatakse metroodes ja linnalähiliinides, kuna

koos DC veduriga on lihtne kasutada regeneratiivset pidurdamist ning pole vajalik paigaldada vedurile lisa muundureid.

Raudtee transpordi populaarsuse suurendamiseks üritatakse eelistatumaks, katsetakse tõsta liikumiskiirust. Seega praegu on arendamisel nii nimetatav kiirraudtee võrk (*high speed rail*). Vastavalt Euroopa direktiivile kiirraudtee all mõeldakse raudteed, mille reisimiskiirus on minimaalselt 250 km/h. Juhul kui on tegemist rekonstrueeritud raudteega, siis sellel juhul reisimiskiirus peab olema vähemalt 200 km/h. [29]

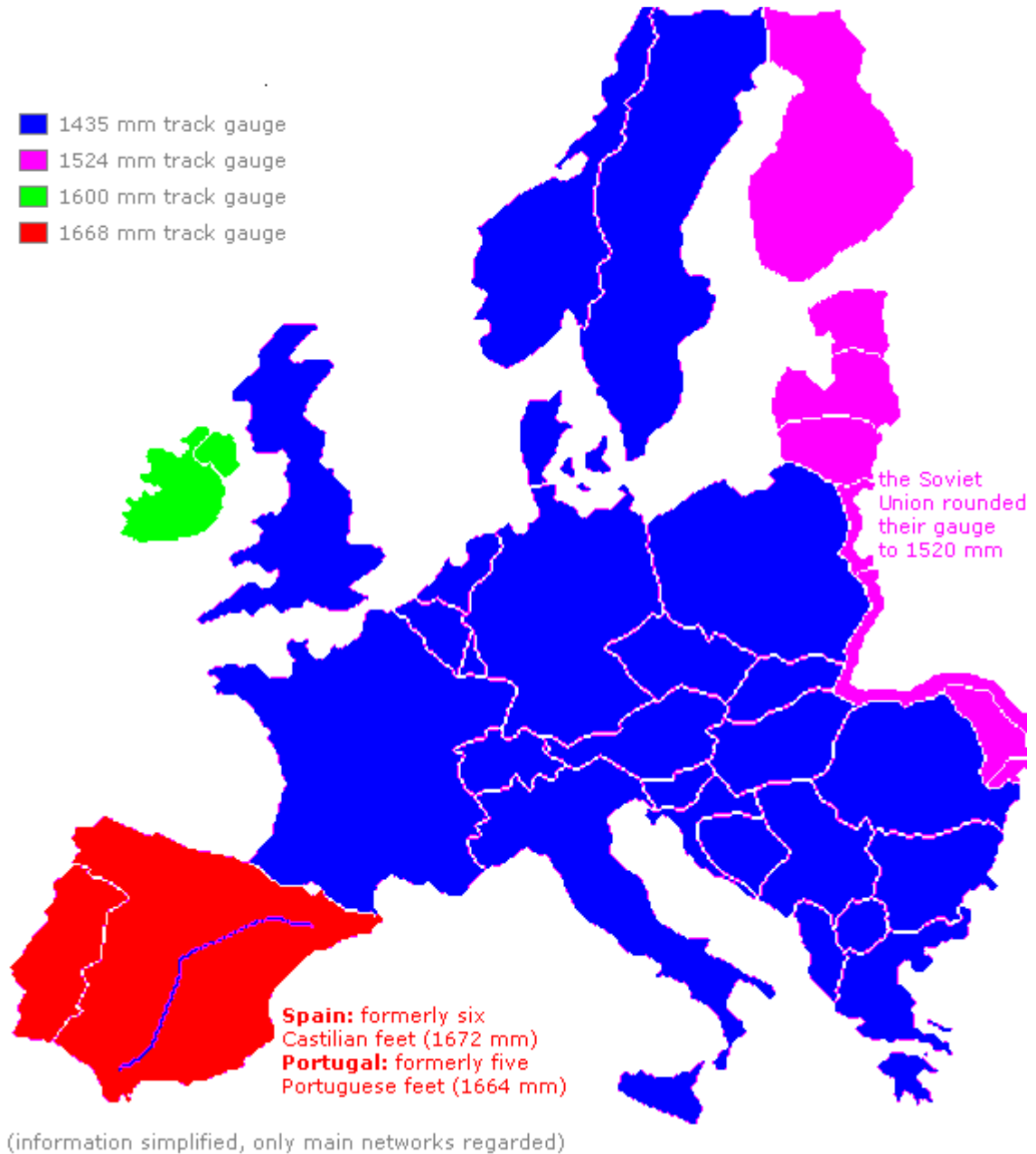
Allpool joonisel 1.16 on näidatud Euroopa raudtee kiiruste piirangud. Kesk-Euroopas on hästi arenenud kiirraudtee (raudteed on lilla, punase, kollase värviga kaardil), aga Ida-Euroopas see on vähe levinud (raudteed on hall värviga kaardil), kuna see nõuab olemasoleva raudteesüsteemi rekonstrueerimist või uute raudteeliinide ehitust, mis vajab suurt investeeringut.



Joonis 1.16. Euroopa raudtee kiirused [30]

Tulenevalt ajaloolistest arengutest on erinevates maades kasutusel erinevad rööpmelaiused. Kesk-Euroopas on kasutusel raudtee rööpmelaius 1435 mm. Endises Nõukogude Liidus on kasutusel raudtee rööpmelaius 1524 mm, mis oli hiljem muudetud 1520 mm.

Erinevad rööpmelaiused takistavad riikidevahelist kaupade ja reisijate transporti raudteega. Tänapäeval, juhul kui rong peab sõitma ühest rööpavahega riigist teise rööpavahega riiki, siis peab olema sooritatud kas reisijate ümberistumine ja kaupade ümber laadimine teise rongi, või vaguni ümber paigutamine teise rööpmelaiusega vankrile. Erinevad rööpmelaiused takistavad raudtee kasutust ning suurenevad reisimisaega.



Joonis 1.17. Euroopa raudteesüsteemi rööpmelaius [24]

Ülalpool toodud joonisel 1.17 on esitatud Euroopa raudteevõrkudes kasutatud rööpmelaiused ning nende jagunemine.

1.4. Rail Balticu projekti sisu

Seoses sellega, et Balti riigid on praegu osa Euroopa Liidust ning on huvitatud ühise Euroopa Liidu transpordimajanduse arendamisest, tuleb parandada ka raudteevõrkude ühendust ülejäänud Euroopa Liidu riikidega. Raudtee transport peab olema konkurendivõimeline alternatiiv kiiresti arenevale autotranspordile ning laevandusele. Kuna ajalooliselt on väljakujunenud, et Balti riikides kasutatakse Kesk-Euroopast erinevat rööpavahet, elektriraudtee pingesüsteemi ning madala kiirusega raudteed, on otstarbekas rajada Balti riikides uus kaasaegne kiirraudtee. Selle tulemusena on kujunenud Rail Balticu projekt.

Rail Balticu projekti eesmärk on parandada Balti riikide raudteetranspordi ühendust teiste Euroopa Liidu riikidega. Rail Baltic on kolme riiki ühendatav rahvusvaheline projekt, mille raames planeeritakse ehitada raudteeühendus Balti riikide (Eesti, Läti ja Leedu) ning Kesk-Euroopa vahel. Leedust rajatakse ühendus Poolaga, kust on võimalik sattuda Saksamaale ning sealt ülejäänud Euroopasse. Allpool joonisel 1.18 on esitatud põhimõtteline Rail Balti raudtee kulgemine Balti riikides.

Seoses sellega, et Balti riikide raudteesüsteemi rööpmelaius on 1520 mm, aga mandri-Euroopa rööpmelaius on 1435 mm, siis Euroopa Liidu initsiatiivil tuleb täiesti integreerida Balti riikide raudteetransport mandri-Euroopaga. Selleks tuleb muuta nii Balti riikide raudteesüsteemi rööpmelaiust kui ka tervet raudteesüsteemi, sh. signaal- ja juhtimissüsteemid.

Rail Balticu projekti eesmärk on luua kaasaegne ning mugav raudteeühendus nii inimeste reisimiseks, kui ka kaubavahetuse jaoks. See peab suurendama nii turismi, kui ka kaubavahetust naaberriikidega tänu suurele liikumiskiirusele, mis on lubatud kuni 240 km/h.

2001 aastal oli Rail Balticu projekti mõte lisatud deklaratsioonis kui prioriteetne projekt, mis oli allkirjutatud Balti riikide ministrite poolt [31]. 2003 aastal Rail Balticu projekt oli määratud kui prioriteetne projekt Euroopa Liidu komitees. Samal aastal oli määratud kaks Europaliidu fondi, kust on võimalik finantseerida projekti edasist arendamist [31].



Joonis 1.18. Rail Balticu põhimõtteline kaart [32]

Aastal 2005 määras Euroopa Komisjon firma, kes pidi tegema Rail Baltica raudtee projekti teostatavusuuringu [31]. Aastal 2007 oli publikuseeritud Euroopa Liidu poolt tellitud Rail Baltica raudtee projekti teostatavusuuringu peamised järeldused ja soovitused, mis on kättesaadavad ka Eesti keeles [33]. Projekti edasiseks arendamiseks peab olema leitud kokkuleppe Balti riikide vahel ning saadud rahastus Euroopa Liidult. Peale seda iga riik peab täpsustama raudteetrassi asukoht ning koostada selleks vajalikud eeluuringud ning planeeringud. Praegu Eestis koostatakse planeeringud ja eeluuringud, kus määratakse raudtee trassi asukoht. Esialgelt on ehitustööde algus planeeritud aastaks 2017 või 2018. Aastaks 2022 planeeritakse saada võimalikult palju ehitustööd valmis [34].

2. Elektriraudtee vedurid

Käesolevas peatükis antakse ülevaade elektriraudtee vedurite põhitüüpidest, nende eelistest ja puudustest ning kirjeldatakse elektriveduri põhielektriseadmeid. Peatükis 2.1 antakse lühidalt ülevaade elektriraudtee vedurite põhitüüpide kasutusotstarbe järgi. Peatükis 2.2 antakse lühidalt ülevaade kontaktvõrgu voolusüsteemidest, kuna see mõjutab veduri ehitust. Peatükkides 2.3 - 2.5 vaadeldakse elektrivedurite struktuuri ning detailselt põhilisi veoajami elektriseadmed: mootor ning muundur. Peatükk 2.6 kajastab lühidalt veomootori juhtimissüsteeme. Peatükis 2.7 vaadeldakse veduri üldlevinumat klassifikatsiooni telgede järgi, mis sisaldab põhiinformatsiooni veosüsteemist.

2.1. Vedurite tüübid

Maailmas on kasutusel hulgaliselt erinevaid vedurite klassifikatsioone. Üks põhiklassifikatsioon on vedurite eristamine kasutamisekoha järgi, mille kohaselt jagunevad vedurid: [35], [36]:

- magistraalvedur (kaubavedur, reisivedur, universaalvedur)
- linna ja linnalähedane elektriraudtee vedur (nt. tramm, troll, metroo, elektrirong)
- tööstusvedur (nt kaevandusvedur)

Võrreldes linna, linnalähedasi ja tööstusvedureid magistraalveduriga on neil suhteliselt väike maksimaalne kiirus ning suur kiirendus [35], [36].

Seoses sellega, et Rail Baltic planeeritakse magistraalraudteevõrguna, siis käesoleva töö raames vaadeldakse vaid magistraalvedureid, mis omakorda jagunevad otstarve järgi:

- sõitjatevedur
- kaubavedur
- universaalvedur

Kasutatakse kolme vedurite põhitüüpi ning samanimelised on ka vastavalt rongide tüübid. Need on reisirong, kaubarong ja universaalrong. Nende põhilised erinevused seisnevad liikumise maksimaalkiiruses ning veetavate veoste kaalus. Kaubarong peab suutma vedada kuni 6000 tonni [37]. On olemas ka väiksemad kaubarongid, mille veose kaal on kuni 2000 tonni [1]. Kaubarongi maksimaalkiirus on tavaliselt 100-120 km/h [37,38]. Reisirong peab suutma vedada keskmiselt kuni 500 tonni [1]. Tema maksimaalkiirus on 180-200 km/h [39]. Universaalvedurit kasutatakse seal, kus vahemaad ei ole eriti suured, või puudub vajadus suurte veoste transportimiseks.

Reisirongi üks alaliik on kiirrong, mis saavutab kiirust rohkem kui 200 km/h [40]. Kiirrongi maksimaalne liikumiskiirus on kuni 350 km/h [41].

2.2. Kontaktvõrgu voolusüsteemid

Kontaktvõrgu voolusüsteemist sõltub veduri ehitus, mistõttu selles peatükis vaadeldakse lühidalt kontaktvõrgu süsteeme. Maailmas on kasutusel erinevad kontaktvõrgu süsteemid. Neid saab jagada kaheks suureks grupiks voolusüsteemi järgi: alalis- ja vahelduvvoolu süsteemid. Vahelduvvoolu kontaktvõrgus edastatakse elektrienergia õhuliini kaudu. Alalisvoolu kontaktvõrgus kasutatakse kas õhuliini või kolmandat rööbast. Õhuliiniga kontaktvõrgus peab olema vähemalt üks õhuliini juhe, millega veduril peab olema elektriline kontakt. Elektrikontakt saavutatakse pantograafi kaudu. Tagasivooluks kasutatakse rööpaid, mis on maapotentiaaliga ning on ühendatud alajaamaga. Üldiselt kasutatakse DC võrku lühemates ja vähem koormatud raudtee liinides, ning AC võrk pikemates liinides. Põhjalikumalt on käsitletud kontaktvõrkusid allikas [42].

Vastavalt ülalpool toodud joonisele 1.15 on kasutusel Euroopas nii alalisvoolu kui ka vahelduvvoolu kontaktvõrgu süsteemid. Allpool on toodud AC kontaktvõrgu olulised eelised, võrreldes DC kontaktvõrguga [28], [43] :

1. AC kontaktvõrgud, kus kasutatakse kõrgemaid nimipingeid (10 kV ning suurem) vajavad vähem toitealajaamu
2. AC kontaktvõrgu alajaamad on lihtsama ehitusega, kuna ei sisalda alaldit
3. Tänu suurematele pingetele vähendatakse kontaktvõrgu juhtme ristlõiget, mille tõttu vähendatakse ehitise kaalu ning seega ka mastide gabariite

Nende majanduslike ja tehniliste põhjenduste kohaselt on otstarbekas kasutada uutes raudtee elektrivõrkudes AC voolusüsteemi, isegi riikides, kus olemasolevates kontaktvõrkudes on kasutusel DC voolusüsteem (vt. joonisel 1.15 - maad Hispaania, Itaalia, Leedu, kus oli ehitatud uued kiirraudteed).

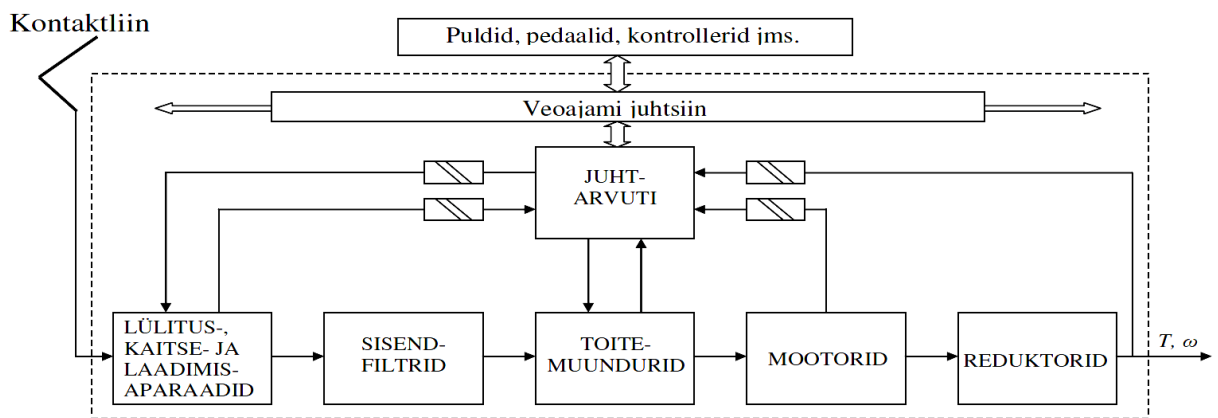
Seoses tänapäeva tendentsiga ning projektis Rail Baltica kasutatavaga AC kontaktvõrgusüsteemiga, vaadeldakse allpool veidi põhjalikumalt AC kontaktvõrgus kasutatavad vedurite ajamite tüüpe, elektrimuundamist ning muundamisega seotud juhtimise võimalusi.

2.3. Elektriveduri struktuur

Elektriraudteevedur koosneb põhimõtteliselt kolmest elektripaigaldise osast:

- energia vahendaja kontaktliiniga
- veoajam
- abi- ning juhtimisseadmed ning - ahelad

Allpool joonisel 2.1 on esitatud skemaatiliselt elektriveduri veoajami struktuur, kus noolega on esitatud energia ning signaalide liikumissuunad. Elektrienergia, mis saadakse kontaktliinist peale lülitus- ja kaitse aparatuuri ning filtreid muundatakse kõlblikuks mootorites kasutamiseks. Mootorites elektrienergia muundatakse mehaaniliseks energiaks, mis mehaanilise jõuülekande kaudu edastatakse ratastele.



Joonis 2.1. Elektriveduri veoajami struktuur [44]

Antud töö raames ei ole uuritud põhjalikumalt veduri ühendus kontaktvõrguga, abiahelaid ja mehaanilisi jõuülekandeid. Antud töö raames on vajalik uurida elektrilisi protsesse, mis toimuvad veduris. Selleks on uuritud veduri ajami põhilisi elektrikomponente: toitemuundurite ning mootorite tüüpe.

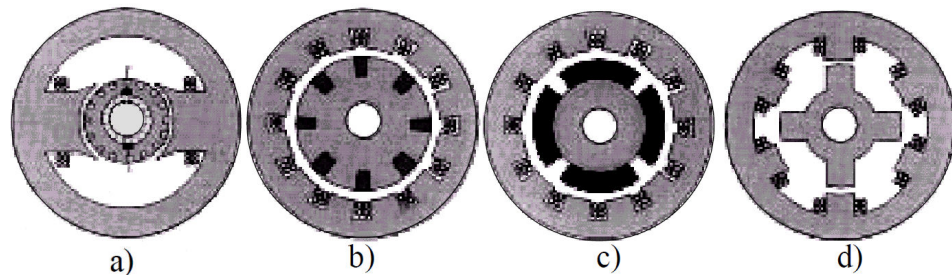
Kaasaegsetes kaugveo elektriraudteedes kasutatakse kontaktõhuliini vedurite elektrienergiaga varustamiseks. Kontaktõhuliini energia vahendajana kasutatakse pantograafi, mis on liikuv mehaaniline seade. Täpsemat infot pantograafide kohta saab leida järgmistes allikates: [42], [45] ja [46].

2.4. Elektriveduri mootor

Alljärgnev elektrivedurite mootorite kirjeldus põhineb allikatel [44], [47]. Sealt on võimalik saada detailsem ülevaade erinevate elektriveduri mootoritest ning nende liigitusest.

Elektriveduri mootorid saab jagada kaheks põhiliseks liigiks: alalisvoolu- ja vahelduvvoolumootorid. Vahelduvvoolu mootorid liigitakse sünkroon- ja asünkroonmootoriteks.

Euroopas on praegu kasutusel erineva voolusüsteemiga veomootorid. Allpool joonisel 2.2 on esitatud laialt levinud veomootorite tüübid.



- a) Kommutaatoriga alalisvoolumootor,
- b) lühisrootoriga asünkroonmootor,
- c) Sõltumatu ergutusega vahelduvvoolu sünkroonmootor,
- d) Kommutatsiooni-reluktantsmootor (sünkroonmootor, Switched Reluctance)

Joonis 2.2. Elektriveduri laialt levinud veomootorite tüübid [47]

Kommutaatoriga alalisvoolumootor on seni olnud veoajamites põhiliseks mootoritüübiks, kuna omab sobivat kiiruse-momendi tunnusjoont. Antud mootori tüübil on olemas kaks olulist puudust. Esimene seisneb mehaanilise kommutaatori olemasolus, kuna see vajab regulaarset hooldamist. Teine puudus seisneb mootori keerulise ehituses, mille tõttu mootori hind on kallim. Alalisvoolu veomootorid on pika elueaga, kui neid on perioodiliselt hooldatud.

Isegi peale vahelduvvoolu mootorite laiaulatuslikku kasutuselevõtmist teistes valdkondades, ei võetud neid kasutusele veduritel, kuna esinesid tehnilised probleemid AC ajami juhtimisega ning kolmefaasilise muundurite kõrge hinna tõttu.

Tänu jõuelektroonika tehnoloogia arengule, on võimalik mehaanilise kommutaatori asemel kasutada pooljuhtkommutaatorit. Uute pooljuhtkommutaatoriga ajami juhtimissüsteemide kasutamine võimaldas parandada ajami üldist kasutegurit, suurendada võimsust massiühiku kohta, vähendada käidu- ja hoolduskulud ning suurendada töökindlust. Pooljuhtkommutaatoriga alalisvoolumootoreid kasutatakse tänapäeval kergematel elektrisõidukitel.

Samuti pooljuhtmuundurite areng võimaldas kasutada alalisvoolumootorite asemel vahelduvvoolumootoreid. Vahelduvvoolu mootoritest laiemat kasutust leidsid lühisrootoriga asünkroonmootorid tänu madalamale algmaksumusele ja väiksematele hoolduskuludele.

Erijuhtudel kasutatakse ka vahelduvvoolu sünkroonmootoreid. Sünkroonmootoreid kasutatakse, näiteks suurema võimsusega raskerongide vedurites. Sünkroonmootor oli kasutusel ka Prantsuse

TGV kiirrongis aastal 1993, enne GTO türistoride laia kasutusele võtmist. Peale GTO türistorite kasutuselevõttu kasutatakse veoajamites peamiselt asünkroonmootoreid [28].

Kaasaegsete nii sünkroon- kui ka asünkroon- vahelduvvoolumootorite juhtimine toimub vektorjuhtimismeetoditega. [44]

Uutes magistraalvedurites eelistatakse vahelduvvoolu mootoreid. [48], [49], [43].

AC mootoritel on olemas rida olulisi eeliseid võrreldes DC mootoritega. Need on [48], [27]:

1. AC mootoritel on lihtsam ehitus, kuna nendel puuduvad mehaanilised kontaktid, näiteks harjad
2. AC mootorid on väiksema kaaluga, võrreldes sama võimsusega DC mootoritega. Seega sama mõõtudega AC mootor on suurema võimsusega, võrreldes DC mootoriga. Raudtee veoajamites on see määrava tähtsusega piiratud ruumi tõttu.
3. Kaasaegne jõuelektroonika ning mikroprotsessorjuhtimine võimaldab juhtida AC mootoreid efektiivsemalt (kasutegur lähedane 100%-le terve võimsuse diapasoonis: nullist täis võimsuseni, ning sujuv kiirendus), seega saavutatakse vajalik *adhesioon* (nake) ning veojõud.
4. Regeneratiivsel pidurdamisel võivad AC mootorid genereerida võimsust praktiliselt peatumiseni, seejuures DC mootorite puhul on see võimatu madalatel kiirustel.
5. AC mootor on vastupidavam ning lihtsamini hooldatav

Vaatamata AC mootorite eelistele toodetakse tänapäeval veel vedureid DC ajamitega [50].

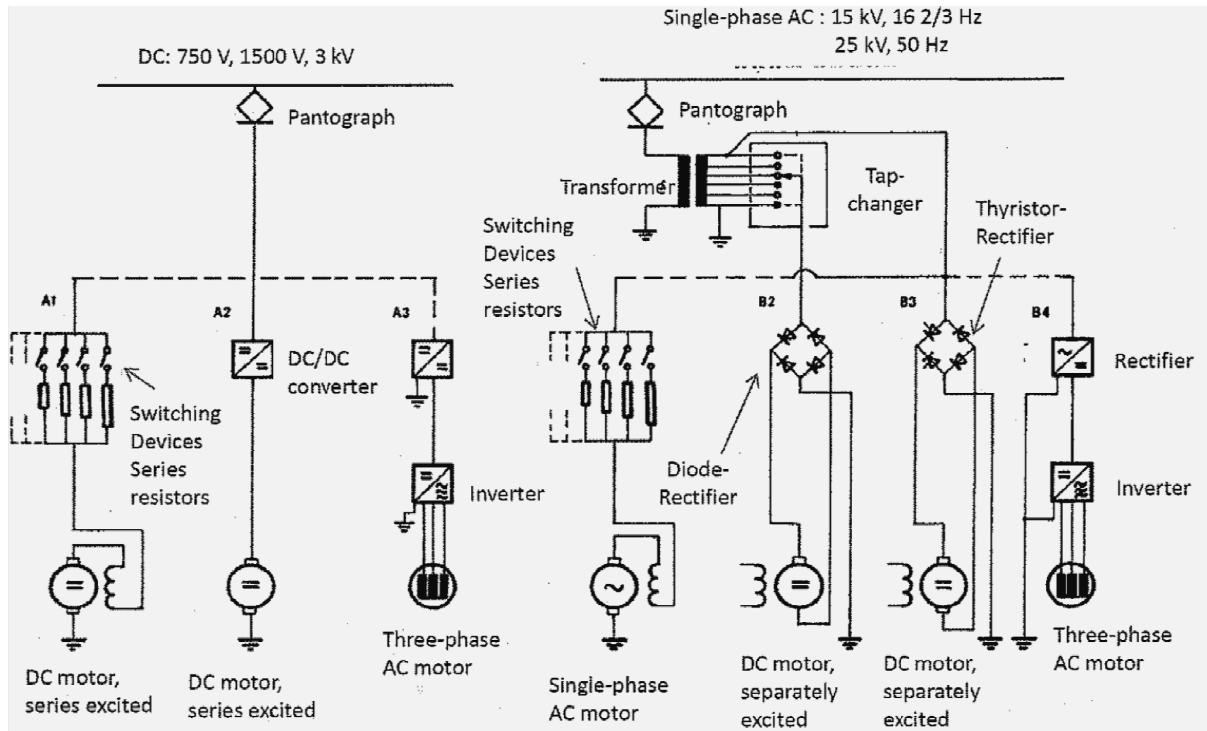
2.5. Elektriveduri muundurid

Tänapäeval on võimalik kasutada mõlemaid nii DC kui AC mootoreid vedurites olenemata kontaktvõrgu voolusüsteemist. Selle saavutamiseks on vajalik kasutada veduris õiget muundurit.

Veomootori tüübi valiku teostab rongi tootja, vastavalt tellitava rongi karakteristikule ning hinnale. Veduri töökarakteristik sõltub nii mootori tüübist kui ka elektrimuundamisest ja juhtimisest. Parima lahenduse saamiseks on kasutusel vedurid AC mootoritega, mis kasutatakse DC kontaktvõrkudes, ning vastupidi DC mootorid, mis kasutatakse AC kontaktvõrkudes. Enamus ajamite tehnilistest andmetest on tootja ärisaladus, ning selle kohta puudub avalik info.

Kontaktvõrk ning veomootor peavad olema omavahel elektriliselt seotud. Selle seose tehniline lahendus sõltub kontaktvõrgu ja veomootori voolusüsteemidest, ning eristatakse AC-AC, AC-DC, DC-DC, DC-AC, kus esimene tähekombinatsioon näitab kontaktvõrgu voolusüsteemi ning

teine tähekombinatsioon näitab veomootori voolusüsteemi. Allpool joonisel 2.3 on näidatud kontaktvõrgu süsteemide ja vedurite põhimõttelised skeemid.

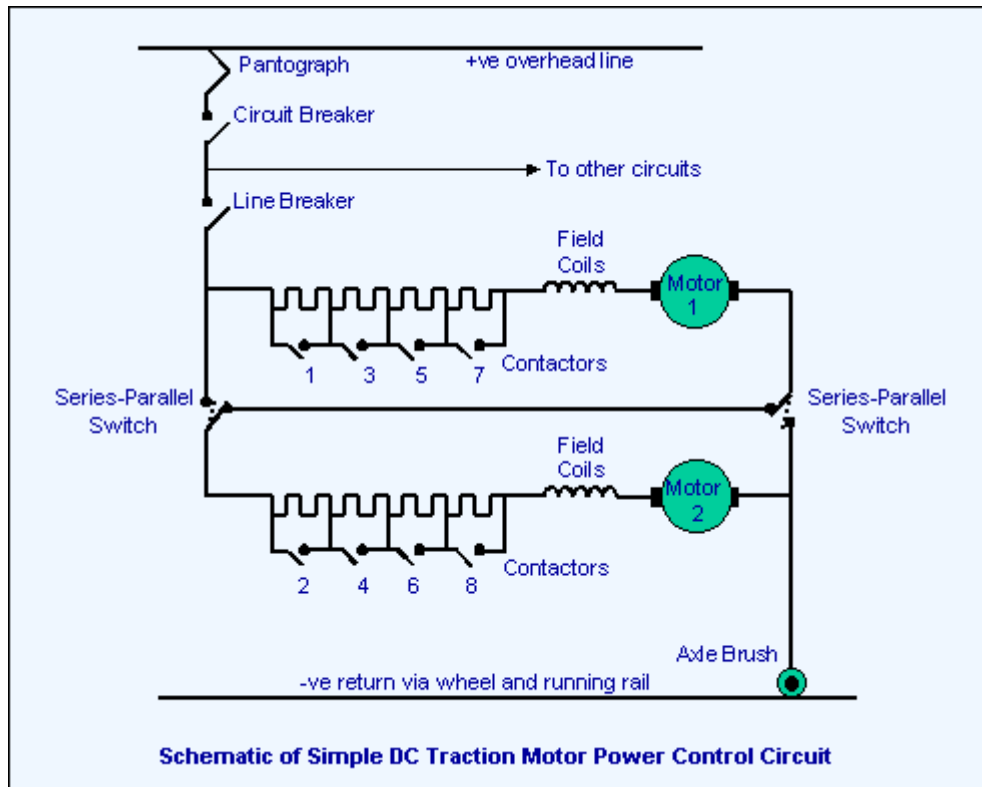


Joonis 2.3. Erinevate kontaktvõrgu süsteemide ja vedurite põhimõttelised skeemid [1]

Veduri ajal on tavaliselt madalam nimipinge kui kontaktvõrgus, seega tuleb ka alandada kontaktvõrgust saadud pinget, milleks kasutatakse pingetalandatavat trafot.

2.5.1. Takistitega reguleerimine

Laialdaselt on veduri ajamites võimsuse reguleerimiseks kasutatud võrguga jadaühenduses olevaid takisteid, mis on omavahel ühendatud rööpselt. Takistid lülitati ühekaupa kasutades mehaanilisi lüliteid vajaliku voolu saamiseks. Antud reguleerimise tüüp omab rida puudusi, mis on seotud lülitusseadmete piiratud lülituste arvuga, ebaühtlase astmelise reguleerimisega ning suurte energia kadudega. Jada- rööptakistitega DC ajami skeem on esitatud allpool joonisel 2.4. Takistite kasutus DC ja AC mootorite juhtimiseks on analoogne, mida kasutatakse kontaktvõrgu ja mootori sarnaste voolusüsteemidega.

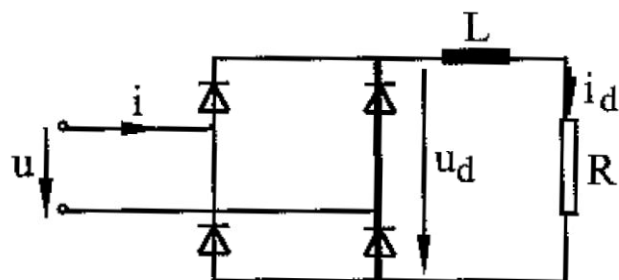


Joonis 2.4. DC ajami takistitega põhimõtteline skeem [51]

Tänu sellele reguleerimise süsteemi puudusele, ei kasuta seda tüüpi süsteemi uuemates vedurites. Selle asemel kasutatakse jõuelektronika seadmeid, mis on kirjeldatud alljärgnevalt. Jõuelektronika seadmete reguleerimise täpsus on suurem ning kasutusiga pikem kui mehaanilistes lülitusseadmetes.

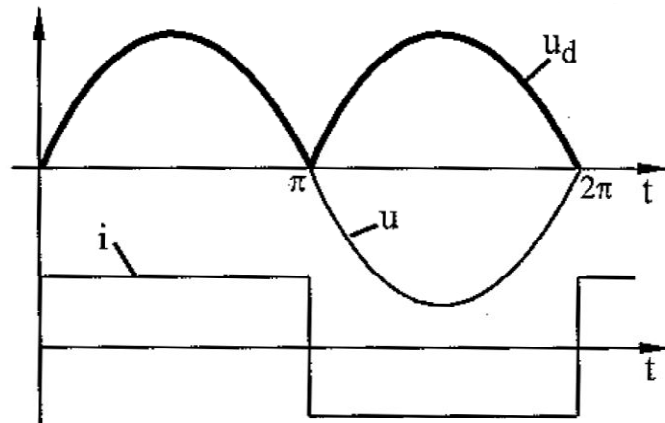
2.5.2. Dioodalaldi

Esimesena jõuelektronika seadmena veduri jõuahelates kasutati dioodalaldi (*diode rectifier*), mis on ühendatud kontaktvõrguga koormuse all reguleeritava trafo kaudu. Alaldi kasutatakse vahelduvpinge (AC) muundamiseks alalispingeks (DC). Dioodalaldi põhimõtteline skeem on esitatud allpool joonisel 2.5. Joonisel on esitatud dioodsild, mis koosneb neljast diodist, mis on ühendatud sild skeemina.



Joonis 2.5. Dioodalaldi põhimõtteline skeem [1]

Dioodalaldi muudab AC pinged (joonisel u) DC pingele (joonisel u_d). DC poolel voolu kuju silumiseks paigaldatakse silumisinduktiivsus L . Dioodalaldi abil ei ole võimalik reguleerida pinget ning võimalik on vaid pinget muundamine AC pingest DC pingele. Allpool joonisel 2.6 on toodud ideaalse dioodalaldi pingete ja väljundvoolu graafik. Reaalsetes tingimustes silumisinduktiivsus L on piiratud, mille tõttu DC poolel esineb voolu pulsatsioon, mis ilmub ka AC poolel.

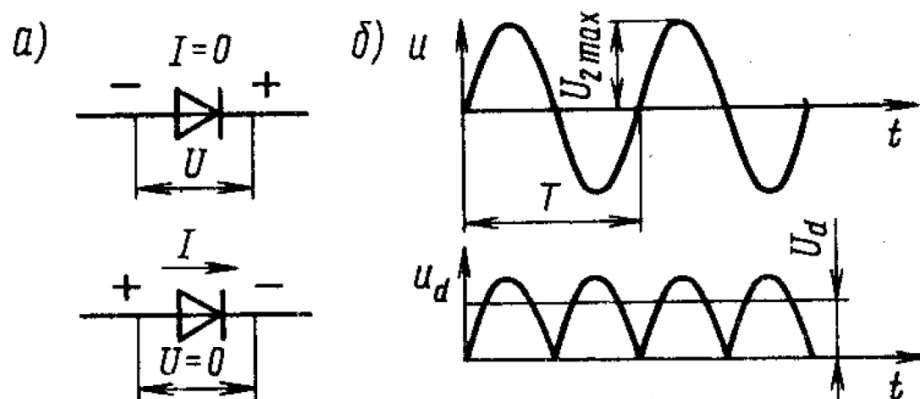


Joonis 2.6. Ideaalse dioodalaldi pingete ja voolu graafik [1]

Tegelikult kasutatakse keskmine alandanud pinget väärtus U_d (vt. joonis 2.7), mida saab avaldada sisendpinge efektiivväärtuse U kaudu järgmise valemiga [37]:

$$U_d = 0,638 \cdot U_{2max} = 0,9 \cdot U \quad (2.1)$$

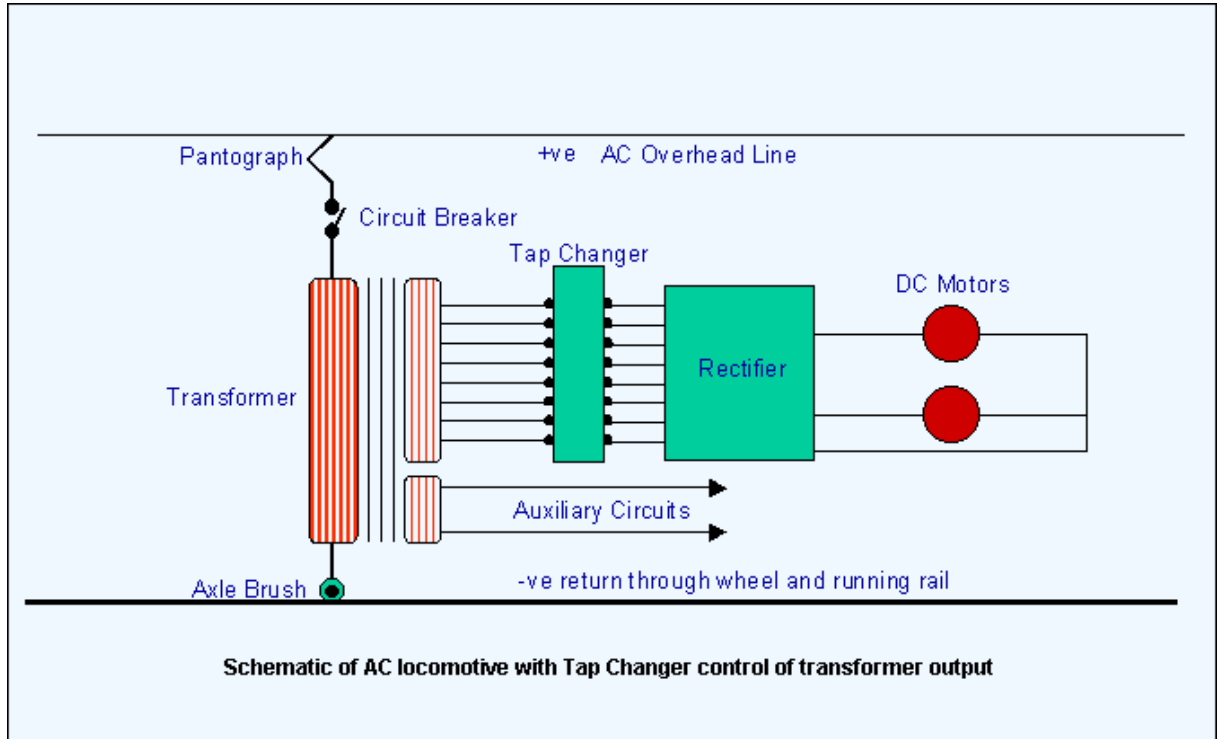
See tähendab, et alandatud pinget keskmine väärtus U_d on 10 % väiksem, kui sisendsiinuspinge efektiivväärtus U .



Joonis 2.7. a) Dioodi tööpõhimõtte seletav skeem, b) sisend- ja väljundpingete graafik [37]

2.5.3. AC-DC vedur

Vaatleme AC-DC veduri tööpõhimõttelise skeemi, kus alaldina kasutatakse dioodalaldit (vt. joonis 2.8).



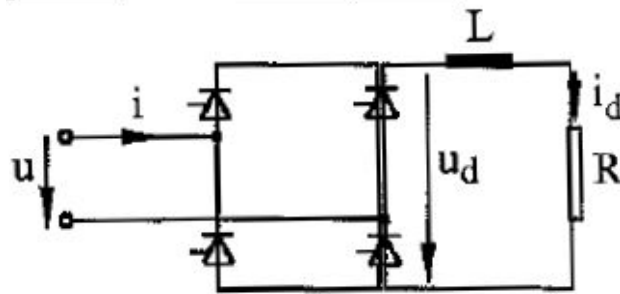
Joonis 2.8. AC-DC veduri põhimõtteline skeem [28]

Vahelduvpinge võetakse kontaktvõrgust pantograafi kaudu, peale mida saadetakse kaitseseadmete kaudu elektrienergia pingetalandatavale trafole. Trafol kontaktvõrgu pinget alandatakse vajalikule tasemele. Pinge reguleerimiseks kasutatakse trafo astmelüliteid. Peale astmelüliti vahelduvvool muundatakse alalisvooluks dioodalaldis, mille järel alalisvool edastatakse veomootorile. Diodalaldi on hooldusvaba, mille tõttu võeti see laialdaselt kasutusele AC kontaktvõrgus 1960-ndatel aastatel.

2.5.4. Türistoralaldi

Diodalaldi peamine puudus on pinget reguleerimise võimaluse puudumine. Pinget reguleerimise võimaldamiseks asendati diodid koos trafo astmelülititega türistoridega. Türistor on pooljuhtelement, mis juhib voolu pärast tüürvoolu impulsi andmist tüürelektroodile. Türistor jääb juhtivasse olekusse pärast tüürimpulsi lõppu. Türistor automaatselt suletakse, kui vool läbi türistori väheneb nulli lähedaseks.

Türistoralaldi (*thyristor inverter*) põhimõtteline skeem on esitatud allpool joonisel 2.9.



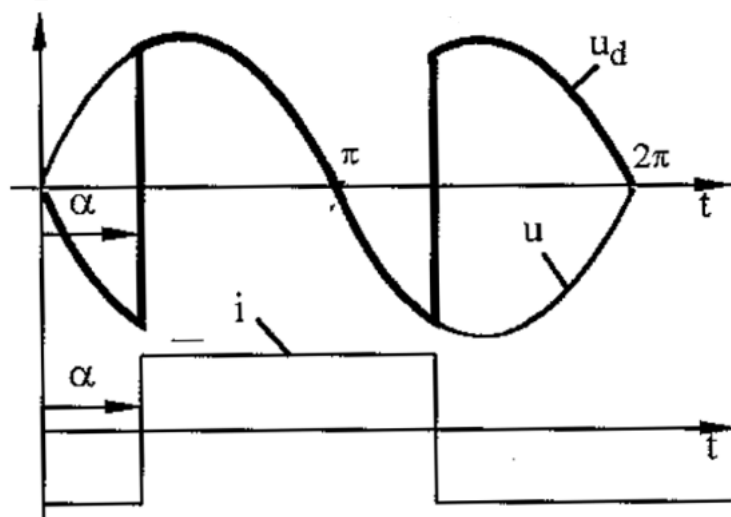
Joonis 2.9. Türistoralaldi põhimõtteline skeem [1]

Türistoralaldi pinget ja voolu graafik on esitatud allpool joonisel 2.10. Türistori avamiseks vajalikul ajahetkel saadetakse juhtimisahelasse voolu impulss (vt. joonisel nurk α). Türistoralaldi kasutamine võimaldab loobuda pinget alandatava trafo pinget reguleerivast seadmest. Selle pärast türistoralaldit nimetatakse täielikult juhitavaks alaldiks. Seega türistori kasutus võimaldab sujuvamalt reguleerida mootori pöördemomenti, mis omakorda võimaldab paremini ära kasutada naket ning seega saavutada maksimaalset veojõudu. DC poolel voolu kuju silumiseks paigaldatakse DC poolel silumisinduktiivsus L .

Juhul kui türistoralaldi skeemis seada juhtivimpulss ajaviitega α , siis alaldatud pinget keskmise väärtust saab avaldada sisendpinge efektiivväärtuse U kaudu järgmise valemiga [37]:

$$U_d = \sqrt{2} \cdot U \cdot \frac{1 + \cos \omega \alpha}{\pi} \quad (2.2)$$

See tähendab, et alandatud pinget keskmist väärtust U_d saab reguleerida vahemikus 0 kuni $0,9 \cdot U$ sisendsiinuspinge efektiivväärtusest U .



Joonis 2.10. Türistoralaldi pinget ja voolu graafik [1]

Kasutades antiparalleelseid türistore võimaldab türistoralaldi juhtida voolu ka vastassuunas, mis on vajalik regeneratiivsel pidurdamisel. Türistoralaldi põhi puudus on väljundvoolu signaali

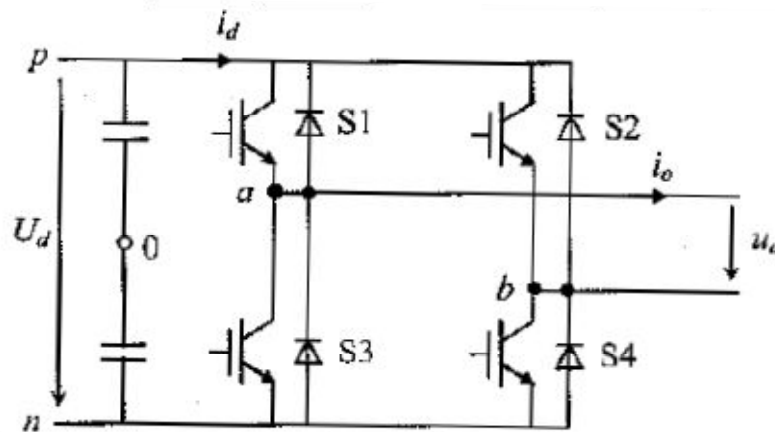
ebaõige kuju ning madal võimsustegur. Võimsustegur sõltub nurgast α ning see on minimaalne kui nurk α omab maksimaalset väärtust.

Hiljem võeti kasutusele GTO (*Gate Turn Off*) tüüpi türistorid, kus on võimalik nurgaga α nii avada kui sulgeda jõuahelat. Türistori sulgemiseks saadetakse juhtimisahelasse voolu impulss. See on viimane jõuelektronika põlvkond, kus kasutati DC mootoreid, praeguseks hetkeks on lõpetatud DC mootoritega lahenduste arendamine ning nende kasutamine uutest vedurites [28].

2.5.5. Transistorvaheldi

AC mootorite võimsuse ära kasutamiseks, tuleb kasutada kolmefaasilised vahelduvvoolu mootorit. Kuna vahelduvvoolu kolmefaasilist kontaktvõrku oma keerulise ehituse tõttu ei kasutata, siis tuleb ühefaasilise kontaktvõrgu pinge muundada kolmefaasiliseks pingeks. Selleks ühefaasiline vahelduvpinge muundatakse alalispingeks ja inverteris muudetakse kolmefaasiliseks vahelduvpingeks.

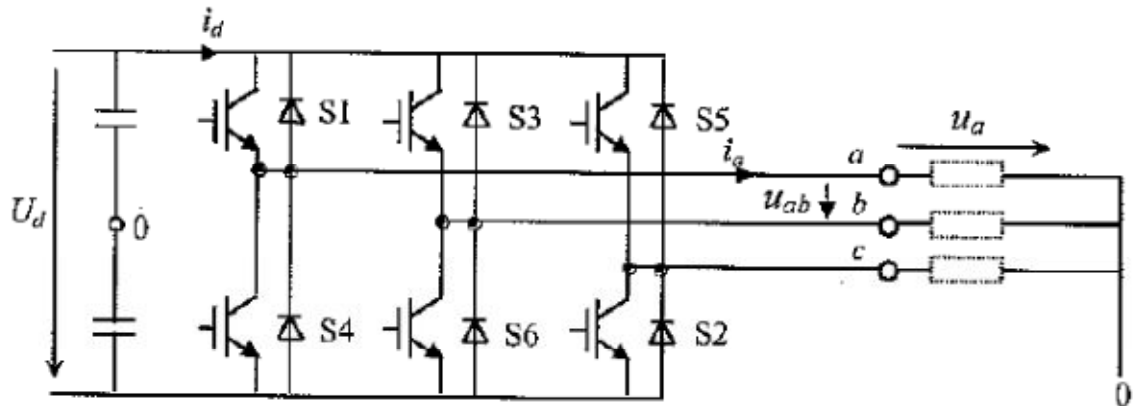
DC pinge invertteerimiseks AC pingeks kasutatakse transistorvaheldit, milles kasutatakse IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) transistoreid. Tulemusena saadakse puhtalt ruudukujuline pinge. Ühefaasilise türistorvaheldi põhimõtteline skeem on esitatud allpool joonisel (vt. joonis 2.11), kus u_d on sisend alalispinge ning u_o on väljund vahelduvpinge.



Joonis 2.11. Ühefaasilise transistorvaheldi põhimõtteline skeem [1]

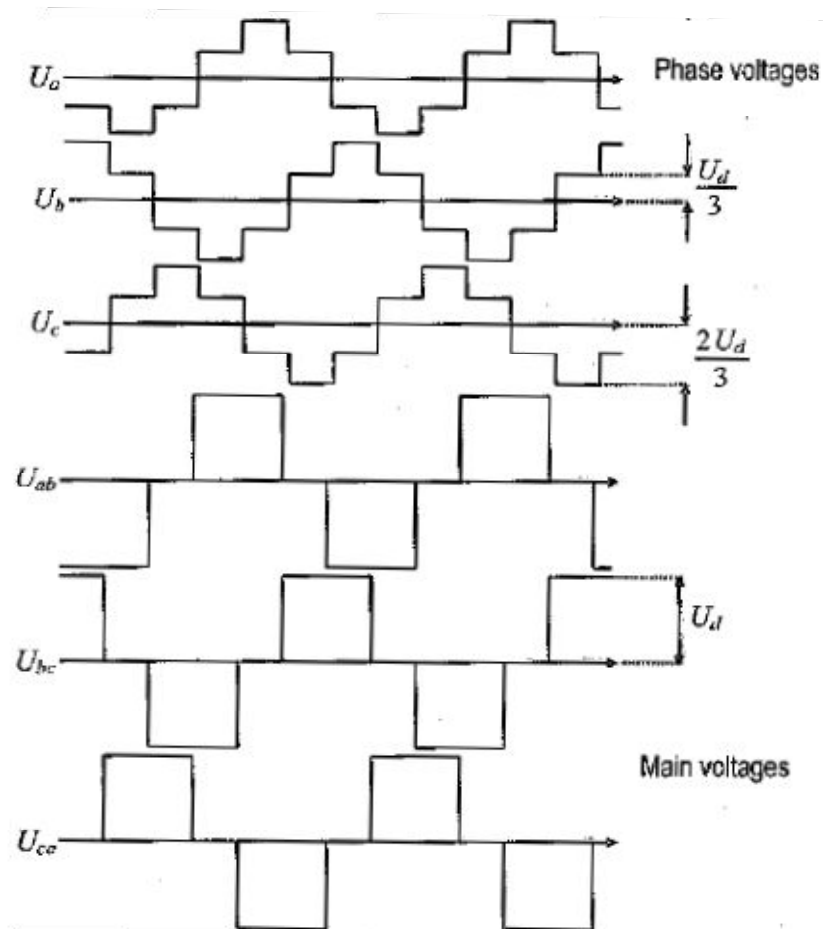
IGBT võib talitleda väga kõrgete vooludega (> 1000 A), lülitamise kiirus on 3-4 korda suurem võrreldes GTO türistoridega. Lülitamise kiirus ning väikesed mõõdud vähendavad summaarseid soojuskadusid, seega ta vajab vähem jahutamist. Suur lülitamise kiirus teeb mootori juhtimine veel sujuvamaks [52], [28].

Kolmefaasilise transistorvaheldi põhimõtteline skeem on esitatud allpool joonisel 2.12. Kolmefaasilises transistorvaheldis on igas faasis vastuparalleelses ühenduses kaks transistorit, ühendatuna rööpselt diodiga.



Joonis 2.12. Kolmefaasilise transistorvaheldi põhimõtteline skeem [1]

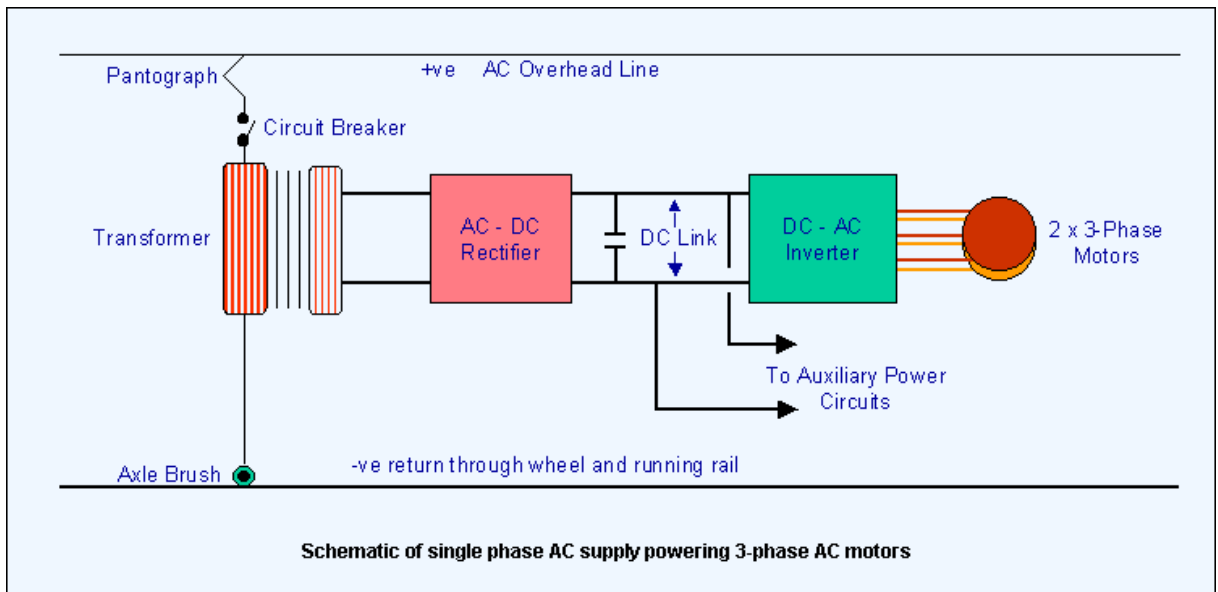
Allpool joonisel 2.13 on toodud kolmefaasilise transistorvaheldi faasi- ja liinipingete graafikud, kus on nähtav, et liinipinge on ruudukujuline.



Joonis 2.13. Kolmefaasilise transistorvaheldi pingetegraafik [1]

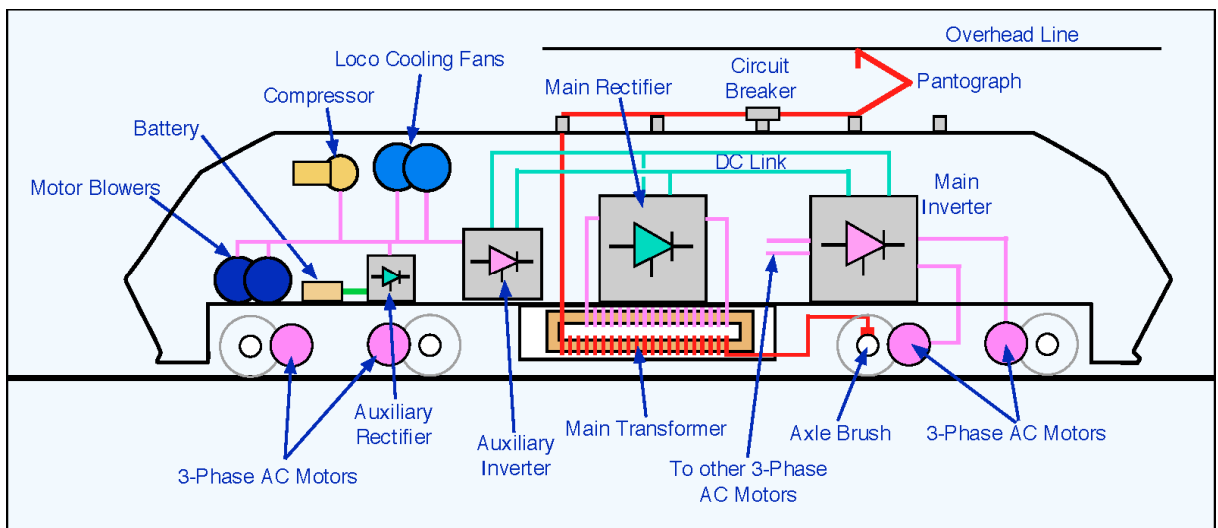
2.5.6. AC-AC vedur

Vaatleme AC-AC veduri tööpõhimõttelise skeemi, kus vajaliku vahelduvpinge saamiseks kasutatakse GTO türistoralaldit ning transistorvaheldit (vt. joonis 2.14). Vahelduvpinge võetakse kontaktvõrgust pantograafi kaudu, mille järel saadetakse pingetalandatavale trafole. Saadud vahelduvpinge alandatakse GTO türistoralaldis alalispingeks (1500 - 2000 V), mis seejärel invertteeritakse reguleeritavaks kolmefaasiliseks vahelduvpingeks transistorvahendis, mis edastatakse kolmefaasilise vahelduvpinge veomootoritele [28].



Joonis 2.14. AC-AC veduri põhimõtteline skeem [28]

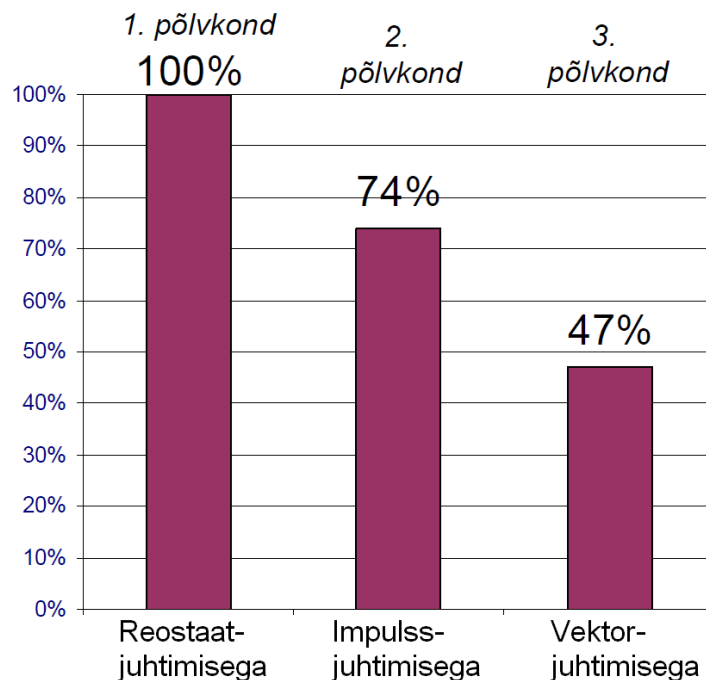
Allpool joonisel 2.15 on esitatud AC-AC veduri põhimõtteline joonis, kus on näidatud põhikomponentide paigaldus veduris. Lisaks ülalpool kirjeldatud seadmetele on näidatud ka abiahelate alaldi ning muud abiahelate seadmed.



2.6. Veomootori juhtimissüsteemid

Juhtimissüsteem sõltub otseselt kasutatavatest ajamite muundurite tüübist. Juhtimissüsteemid saab jagada kolmeks põlvkonnaks. Esimesse põlvkonda kuuluvad elektromehaanilised juhtimissüsteemid. Elektromehaanilistes süsteemides kasutatakse kiirendusreostaate, kontakteid ning releesid. Teise põlvkonda kuuluvad elektroonilised süsteemid, kus kasutatakse pooljuhtsüsteeme, pooljuhtmuundureid ning pooljuhtregulaatoreid, mis võimaldavad impulssjuhtimist. Kolmandasse põlvkonda kuuluvad digitaalsed juhtimissüsteemid, kus kasutatakse programmeeritavad kontrollereid, mis võimaldavad vektorjuhtimist. [54]

Kasutatavast veomootori juhtimissüsteemist sõltub veoajami energiatarve. Allpool joonisel 2.16 on esitatud kolme erineva juhtimissüsteemidega elektriveoajamite energiatarbe võrdlus. Joonisest on nähtav, et vektorjuhtimine võimaldab säästa kuni 53% tarbitavast energiast.

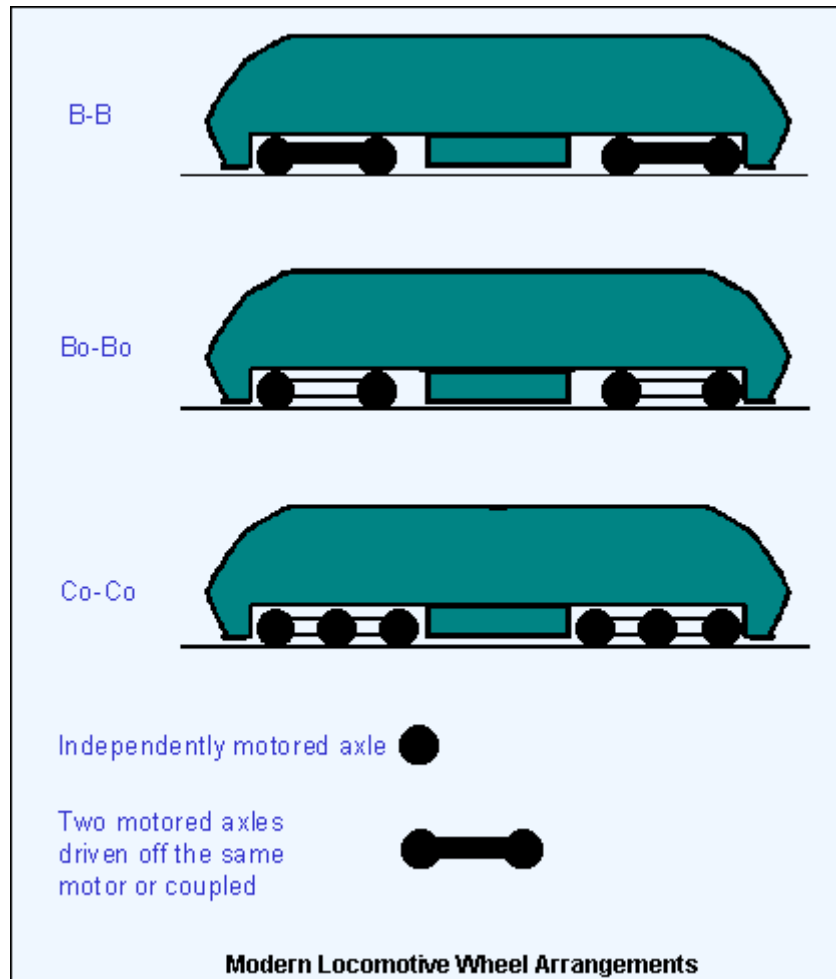


Joonis 2.16. Erineva juhtimissüsteemidega elektriveoajamite energiatarbe võrdlus [54]

2.7. Vedurite klassifikatsioon telgede järgi

Veduritel on olemas kahte tüüpi rattaid: vedav ja mittevedav. Rattad on ühendatud sillaga, ning seega vedureid klassifitseeritakse sildade kaupa. Vedavad sillad võivad olla varustatud kas omaette ajamiga, või siis kõrvuti asuvad vedavad sillad varustatakse ühe ajamiga. Tänapäeval kasutatakse vedureid ilma mittevedava sillata, ehk kõik sillad on vedavad. Allpool joonisel 2.17 on esitatud kaasaegsete vedurite rataste asetuse näidis. Tähtede kombinatsioon näitab veduril

sildade asetust, kus igas raamis asuvad sillad on eraldatud "-" märgiga, suur täht näitab ühes raamis sildade arvu vastavalt tähe järjekorranumbrile tähestikus, väike täht "o" lisatakse siis, kui sillal on oma ajam.



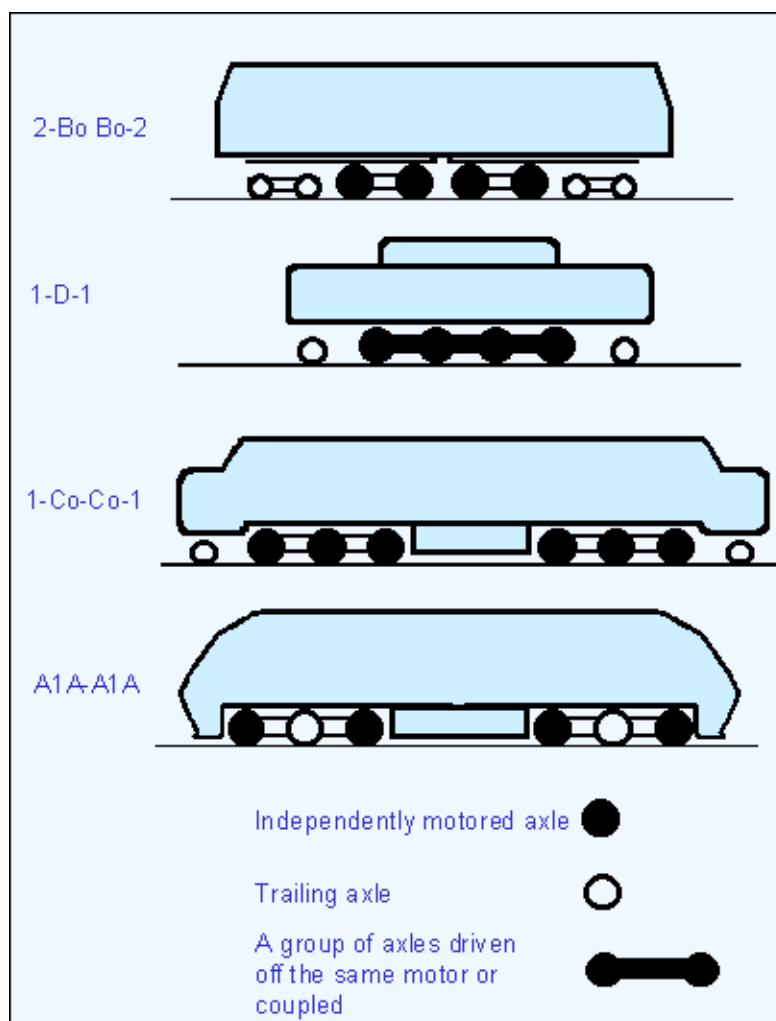
Joonis 2.17. Kaasaegsete vedurite rataste asetus [55]

Varasematel veduritel kasutati ka mittevedavaid rattaid, seega nende klassifikatsioonis on lisatud numbrid, mis näitavad mittevedavate sildade arvu. Allpool joonisel 2.18 on toodud varasemate vedurite rataste asetuse näidis.

Ülalpool esitatud märgistus on kõige levinum, aga on võimalik kohata ka teisi, kus näiteks raamide eraldamiseks märgi "-" asemel kasutatakse märki "' ' " või "+".

Venemaal on kasutusel teine vedurite klassifikatsioon telgede järgi. Näiteks valem $3o + 3o$ näitab, et tegemist on kuue teljelise veduriga, mis koosneb kahest kolmeteljelisest raamist. Märk "o" näitab, et igal teljel on oma ülekanne veomootorist ning märk "+" näitab, et raamid on ühendatud omavahel liigendiga. Valem $2o - 2o - 2o - 2o$ näitab, et tegemist on kaheksa teljelise

veduriga, millel on neli kaheteljelist raami, mis omavahel pole ühendatud. Laialdaselt on kasutusel ka vedurid teiste teljevalemitega: $2o + 2o + 2o + 2o$ ning $3o - 3o$ [56].



Joonis 2.18. Varasemate vedurite rataste asetus [55]

3. Vedurite tunnusjooned

Käesolevas peatükis käsitletakse elektrivedurite peamisi tunnusjooni ning elektrivedurite modelleerimise alused. Peatükis 3.1 antakse lühidalt ülevaade rongi liikumise arvutusvalemitest, kus esitatakse vajaliku veojõu arvutamise käik. Peatükis 3.2 antakse ülevaade veduri põhilistest karakteristikutest. Peatükkides 3.3 vaadeldakse elektrivedurite mudelite variante, mida on kasutatud modelleerimisel. Peatükk 3.4 kajastab lühidalt veduri modelleerimiseks vajalikku põhiinformatsiooni.

3.1. Rongi liikumise arvutusvalemid

Antud peatükis esitatud arvutusvalemid on võetud järgmisest allikast [1], ning osaliselt ka allikast [57].

Veduri ajami poolt tarbitava elektrivõimsust P on võimalik avaldada valemiga:

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta} \quad (3.1)$$

kus F – veojõud, N

v – sõiduki kiirus, m/s

η – reduktori ja koormuse ülekandemehhanismide summaarne kasutegur

Veojõudu F on võimalik avaldada valemiga:

$$F = m_a \cdot a + D \quad (3.2)$$

kus m_a – rongi ekvivalentne dünaamiline mass, kg

a – sõiduki kiirendus, m/s²

D – liikumise takistusjõud, N

Rongi ekvivalentnes dünaamilises massis m_a , peale rongi staatilist massi m on arvestatud ka pöörlevate masside inertsimõju. Rongi ekvivalentne dünaamiline mass m_a arvutatakse valemiga:

$$m_a = m + \sum_{i=0}^{n_w} J_i / r_i^2 \quad (3.3)$$

kus n_w – rattapaaride arv (*wheel-set*), tk

J_i – ühe rattapaari inertsimoment, kg·m²

r_i – ratta raadius, m

Rattapaari inertsimoment J_i avaldub valemiga:

$$J_i = k_g^2 \cdot J_m + J_w \quad (3.4)$$

kus k_g – ajami ülekandesuhe, sü

J_m – rootori inertsimoment, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

J_w – rattapaari ja ülekande inertsimoment, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

Tavaliselt rongi ekvivalentsses dünaamilises massis m_a on 5-10% suurem, kui staatiline mass m [1].

Liikumise takistust D võib avaldada nelja komponentide kaudu:

$$D = D_r + D_a + D_k + D_g \quad (3.5)$$

kus D_r – veeretakistusjõud (*rolling resistance*), N

D_a – aerodünaamiline takistusjõud (*aerodynamic resistance*), N

D_k – kõveruse takistusjõud (*curve resistance*), N

D_g – gradiendi takistusjõud (*gradient resistance*), N

Veeretakistusjõud D_r sõltub rataste hõõrdumisest, rataste ja rööbaste ebatasasusest, rataste roomavusest jne. Veeretakistusjõudu D_r saab ligikaudselt avaldada valemiga:

$$D_r = m(c_1 + c_2 \cdot v) \quad (3.6)$$

kus c_1 – tegur, $c_1 = 0,01 \dots 0,02$, N/kg

c_2 – tegur, $c_2 = 0,00015 \dots 0,0003$, s^{-1}

Aerodünaamilise takistusjõu D_a mõju on märkimisväärne suuritel kiirustel, nt üle 100 km/h.

Aerodünaamilist takistusjõudu D_a saab arvutada valemiga:

$$D_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{rel}^2 \cdot A \cdot C_D(\beta) \quad (3.7)$$

kus ρ – õhu tihedus (1,3), kg/m^3

v_{rel} – suhteline õhu kiirus, m/s

A – rongi aktiivne õhutakistuspind, m^2

$C_D(\beta)$ – aerodünaamiline tegur, mis sõltub tuule puhumise nurgast β , sü

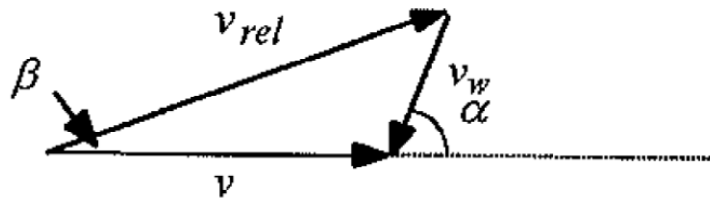
Suhteline õhu kiirus v_{rel} avaldatakse valemiga:

$$|v_{rel}| = \sqrt{v^2 + v_w^2 + 2 \cdot v_w \cdot \cos \alpha} \quad (3.8)$$

kus v_w – tuule kiirus, m/s

α – tuule puhumise ja rongi liikluse vaheline nurk (vt. joonis 3.1), °

Vastutuule korral $\alpha = 0$ ning $v_{rel} = v + v_w$. Tagantuule korral $\alpha = 180^\circ$ ning $v_{rel} = v - v_w$.



Joonis 3.1. Külgtuule mõju liikuvale sõidukile [1]

Tuule puhumise nurka β saab avaldada valemiga (vt. joonis 3.1):

$$\beta = \alpha \cdot \tan\left(\frac{v_w \cdot \sin \alpha}{v + v_w \cdot \cos \alpha}\right) \quad (3.9)$$

Orienteerivalt aerodünaamilise teguri $C_D(\beta)$ väärtused kiirrongi jaoks on 2,0 piires, traditsioonilise rongi jaoks on 3,8 [1]. Aerodünaamilise teguri $C_D(\beta)$ arvutus on toodud allikas [58].

Minimaalne aerodünaamiline takistusjõud saavutatakse, juhul kui:

- rongil on pikk ning kitsenev esi- ja tagaosa
- vagunid on omavahel suletud
- pantograaf ning katusele paigaldatavad seadmed ulatuvad välja minimaalselt
- rongi küljepinnad on siledad, ilma välja ulatuvate osadeta
- alusvankri seadmed on suletud põhjakattega

Kõveruse takistusjõud D_k tekib praktikas siis, kui raudtee pöördel väline ratas peab läbima pikema tee võrreldes sisemise rattaga. Selle tõttu tekivad lisa hõõrdejõud. Kõveruse takistusjõud D_k avaldatakse valemiga:

$$D_k = m \cdot \frac{d_k}{r - 44} \quad (3.10)$$

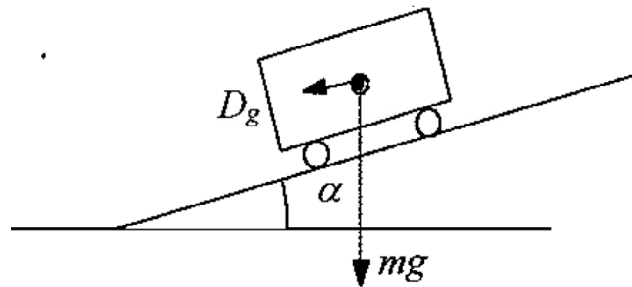
kus m – rongi mass, kg

d_k – kõverustegur = 6,5, m^2/s^2

r – tee kõverusraadius, m

Juhul kui rongis kasutatakse radiaalset roolimist, siis tegurit d_k saab vähendada kuni 2,0.

Sõiduki ülespoole liikumisel peab olema ületatud lisa takistusjõud D_g , mille põhimõte on esitatud allpool toodud joonisel 3.2. Selle ületamiseks peab olema rakendatud tee kallakust tingitud vajalikku tõstejõudu.



Joonis 3.2. Lisa jõud, mis mõjutab sõidukile tee kallakuses [1]

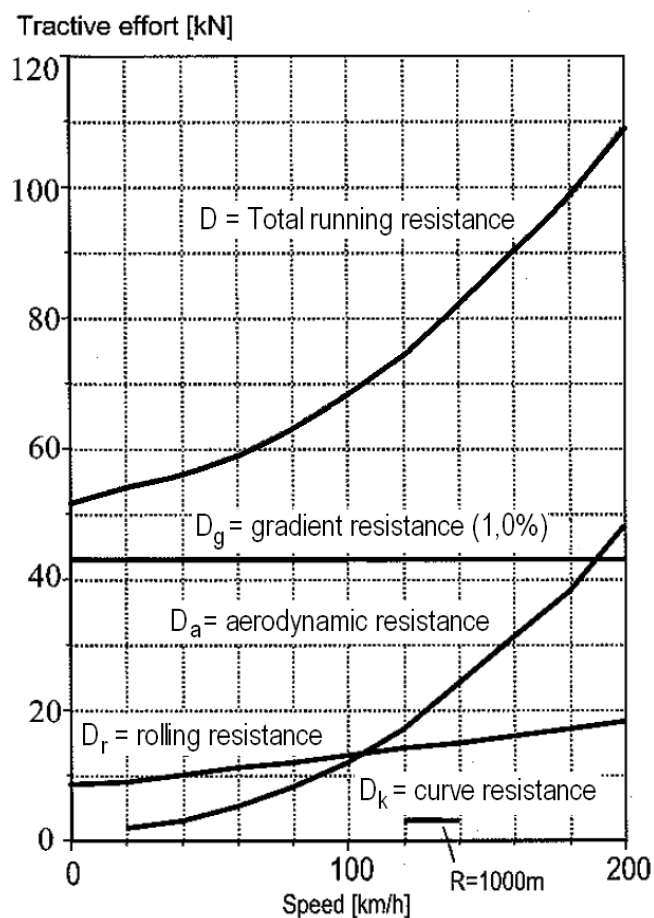
Gradiendi takistusjõud D_g arvutatakse valemiga:

$$D_g = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3.11)$$

kus g – gravitatsiooni kiirendus, m/s^2

α – kallakunurk, $^\circ$

Allpool joonisel 3.3 on toodud näidisenärgi liikumise takistusjõu komponentide graafik. Graafik on koostatud järgmiste parameetritega rongi jaoks: 7 vagunit, mass 430 tonni, õhutakistusvähendaja pindala 12 m^2 , tee kallak 1% ($0,57^\circ$). Vastavalt graafikule kõige rohkem sõltub kiiruse muutusest aerodünaamiline takistusjõud.



Joonis 3.3. Rongi liikumise takistuse D komponentide graafik [1]

Teistes kirjandusallikates [3], [37], [39] ja [57] kasutatakse teisi empiirilisi valemeid liikumise takistuse arvutamiseks. Valemite kasutamisel tuleb arvestada lihtsustuse eelised ning tingimusi, millal valemid kehtivad. Seega et määrata rongi liikumise jaoks vajalikku elektrivõimsust tuleb arvutada rongi ekvivalentne dünaamiline mass ja liikumise takistusjõu komponente. Arvutatud elektrivõimsuse alusel saab valida või projekteerida sobiv elektrivedur vastava karakteristiku järgi. Veduri karakteristikuid vaadeldakse järgmises peatükis (vt. peatükk 3.2).

3.2. Veduri karakteristikud

Elektriveduri liikumise karakteristikud kujutatakse tavaliselt graafikuna, kuna karakteristikud määratakse paljude valemitega, ning on määratavad mitme muutuja vahel. Elektriveduri liikumise seisukohast eristatakse kaks põhilist karakteristikut. Need on kiirendus ja pidurduskarakteristikud. Allpool on vaadeldud mõlemad neist põhjalikumalt.

3.2.1. Kiirendus karakteristik

Elektrilises veosüsteemides eristatakse elektromehaanilisi karakteristikuid mootori võllil, mida nimetatakse veomootori karakteristikuteks ning rattapöial, mida nimetatakse veduri karakteristikuteks [3], [39].

Elektromehaanilised karakteristikud mootori võllil ehk veomootori karakteristikud on mootori parameetrite sõltuvused ankru voolust nimipingel mootori klemmidel. Nendesse kuuluvad mootoriankru nurgakiiruse sõltuvus voolust $\omega = f(I)$, mootori momendi sõltuvus voolust $M = f(I)$ ning mootori kasuteguri sõltuvus voolust $\eta_{mootor} = f(I)$. Mootori elektromehaanilised karakteristikud sõltuvad mootori tüübist. Neid saab arvutada kasutades valemeid või saadakse mootori tüüp-katsetustel tehases [39]. Veomootori elektromehaaniliste karakteristikute arvutusvalemid on esitatud järgmistes allikates [3], [39].

Rattapöial ehk veduri elektromehaanilised karakteristikud on veduri parameetrite sõltuvused ankru voolust nimipingel mootori klemmidel. Nendesse kuuluvad liikumise kiiruse sõltuvus voolust $v = f(I)$, veojõu sõltuvus voolust $F = f(I)$, veduri kasuteguri sõltuvus voolust $\eta = f(I)$. Need karakteristikud saadakse mootori elektromehaanilistest parameetritest, arvestades veoülekande parameetrid. Veduri elektromehaaniliste karakteristikute arvutusvalemid on esitatud järgmistes allikates [3], [39].

Põhiliseks veduri karakteristikuks peetakse veojõu karakteristikut (*tractive effort diagram*), mis näitab veduri veojõu sõltuvust liikumise kiiruse suhtes $F = f(v)$. Antud karakteristik saadakse veduri elektromehaanilistest karakteristikutest $v = f(I)$ ning $F = f(I)$, kus leitakse iga voolu

väärtuse jaoks vastav kiiruse ja veojõu paar [3], [39]. Juhul kui veduril on mitu vedavat rattapaari, siis veduri veojõud F_{vedur} avaldatakse valemiga [3]:

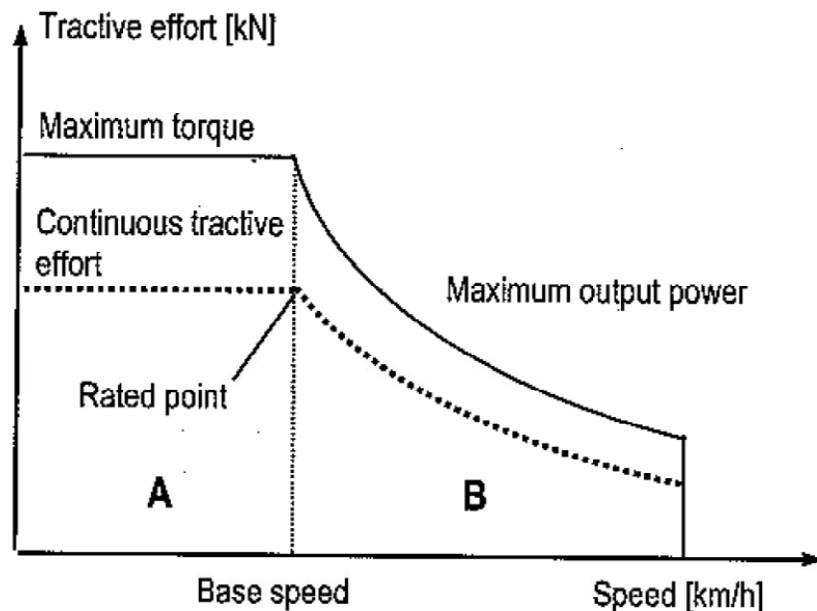
$$F_{vedur} = F \cdot z \quad (3.12)$$

kus F – ühe vedava rattapaari veojõud, N

z – rattapaaride arv, tk

Olemasolevate vedurite jaoks leitakse veojõu karakteristik katsetuste teel [39].

Tavaliselt esitatakse veojõu karakteristik kahe joonega. Esimene joon näitab veojõudu maksimaalsel jõumomendil ning teine joon näitab pideval töörežiimil. See tuleneb asjaolust, et elektrimootoreid võib olulisest üle koormata lühikese aja jooksul ilma, et nad üle kuumeneksid. Allpool joonisel 3.4 on toodud veduri tüüpiline veojõu karakteristik. Joonisel pidev joon näitab veduri maksimaalset veojõudu, mida vedur arendab piiratud aja jooksul. Joonisel katkendjoonega on näidatud veojõud, mida vedur arendab pidevalt. Maksimaalse ja pideva veojõudu suhe sõltub veduri tüübist, ning varieerub tunduvalt erinevates mudelites. Graafikult on näha kiiruse väärtus, millest alates on mootori jõumomendi kasutus piiratud. Seda kiirust nimetatakse baaskiiruseks [1].

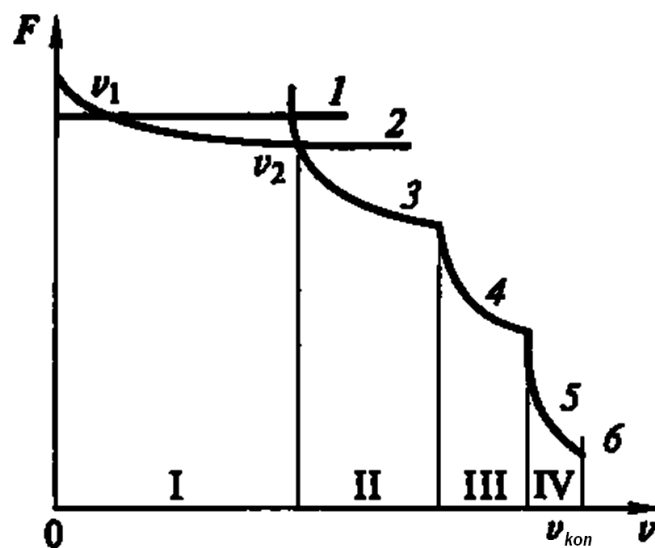


Joonis 3.4. Veduri tüüpiline veojõu karakteristik [1]

Erinevatel liikumise kiirustel piiravad maksimaalset veojõudu füüsilised nähtused. Seega veduri veojõu karakteristiku saab jagada osadeks vastavalt piirajate iseloomule. Nende arv sõltub veoajami tüübist, konstruktsioonist ning juhtimis põhimõttest. Allpool joonisel 3.5 on välja toodud põhilised veojõu karakteristiku piiramisalad. Need on [3]:

1. mootori maksimaalse voolu järgi
2. maksimaalse rataste haare järgi
3. muunduri võimsuse järgi
4. reaktiivse elektromotoorjõu järgi
5. maksimaalne ergutuse nõrgestuse järgi
6. konstruktiivse kiiruse järgi.

Kaasaegse juhtimisega kiirrongidel võib olla vähem piiramisalasid, kui on näidatud allpool joonisel 3.5. Seejuures alati eksisteerivad väikestel kiirustel maksimaalse mootori voolu või rataste haare piirangud ning rongi maksimaalse konstruktiivse kiiruse piirang. Maksimaalne mootori vool omakorda määrab maksimaalse mootori jõumomendi.



Joonis 3.5. Veduri veojõu karakteristiku piiramisalad [3]

Rataste haare rööbastega sõltub veduri massist, trassi kaldest, hõõrdumise tingimustest sh ilmastiku oludest. Tuleb arvestada, et rataste pöörlemiskiiruse järsk suurendamine ei too kaasas ja rongi kiiruse järsku muutust. Liigne rataste pöörlemiskiiruse suurendamine võib isegi põhjustada rongi aeglustumise, juhul kui rattad kaotavad rööpastega haarde. Täpsem info rataste haardest on leitav allikast [1].

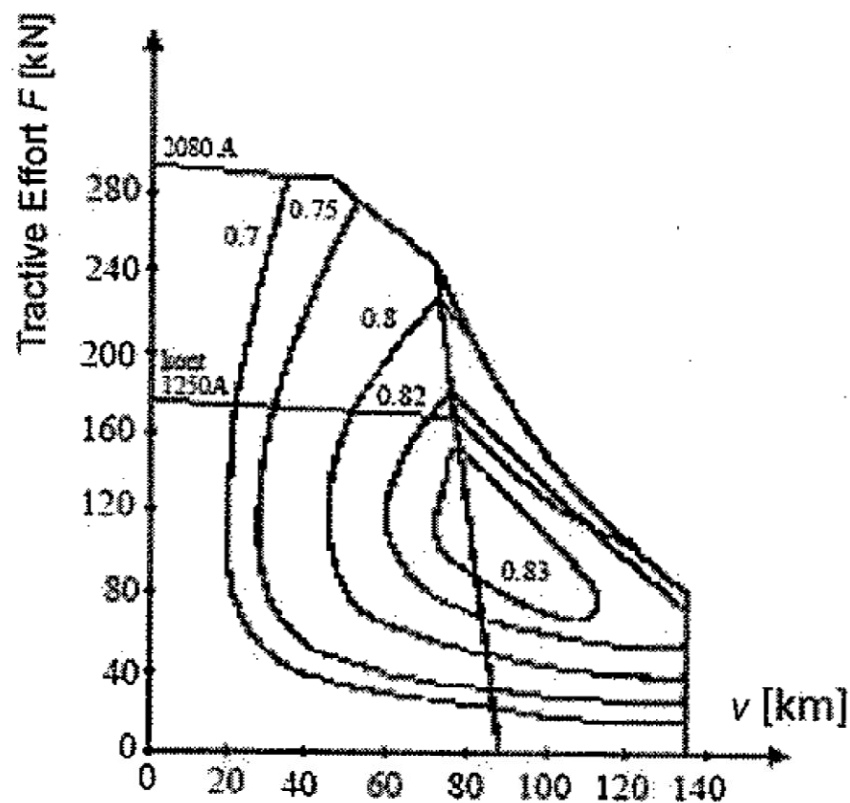
Tavaliselt veojõu karakteristik on langev funktsioon, mis tähendab, et kiiruse suurendamisel vähendatakse veojõudu. Seejuures languse määr χ on individuaalne suurus igale veduri mudelile, mis määratakse valemiga [3]:

$$\chi = -\frac{dF}{dv} \quad (3.13)$$

Kasutades veduri veojõu karakteristikut ja valemit (3.1) saab arvutada tarbitavat elektrienergiavõimsuse. Täiendavalt on vajalik teada ka veduri kasutegurit, mis ei ole konstante

väärtus ning varieerub kiiruse muutmisel ning sõltub veduri komponentidest ning juhtimisest. Allpool joonisel 3.6 on toodud näidisenä Roots'i veduri Rc5 veojõu ja kasuteguri karakteristik. Jooniselt on näha, et väiksematel kiirustel on kasutegur väiksem. Maksimaalne kasutegur saavutatakse baaskiirusel.

Väikestel kiirustel (kuni 50 km/h) pideva veojõuga sõitmisel on veojõud ca 175 kN. Kui samadel kiirustel rakendada maksimaalset jõumomenti, et saavutada maksimaalset kiirendust, on veojõud ca 290 kN, mis on 65% suurem. Suurematel kiirustel kahe režiimi veojõu vahe väheneb, ning langeb nullini konstruktiivsel kiirusel.



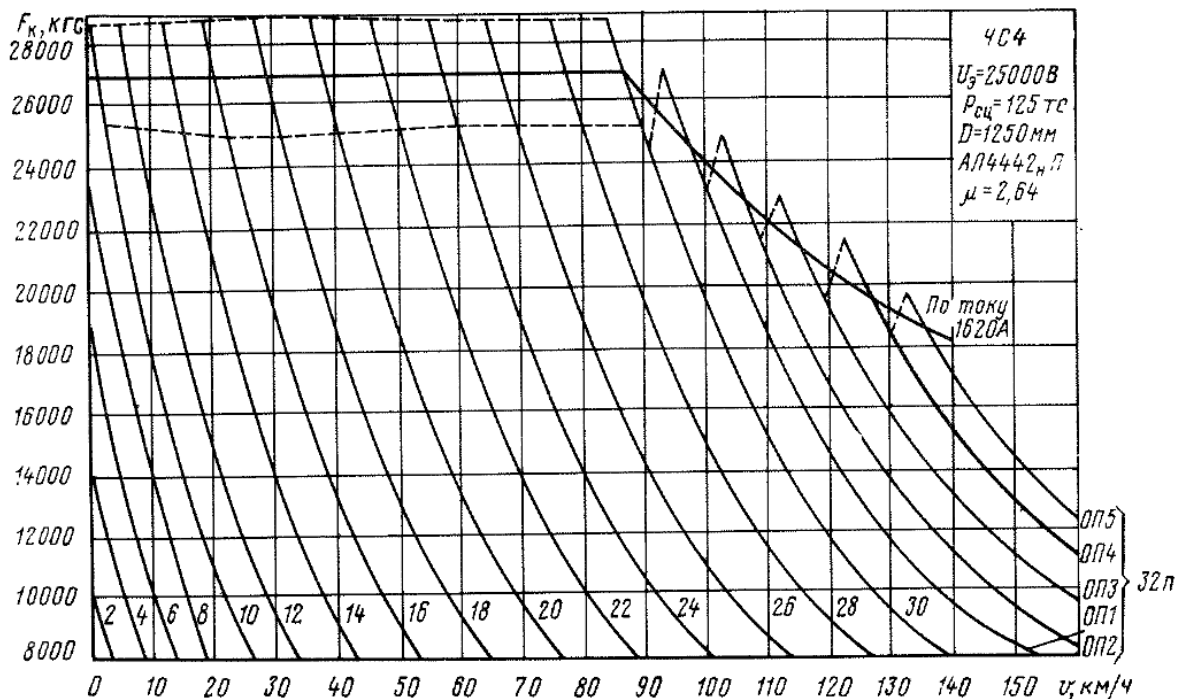
Joonis 3.6. Roots'i Rc5 veduri veojõu ja kasuteguri karakteristik [1]

Lubatud kiirendus on seotud peale tehniliste piirangute ka reisija mugavusega. Kiirendus on üks põhiparameetritest, millega määratakse reisija sõidumugavust. Seetõttu rongide kiirenduskarakteristik erineb veduri tüüpide järgi. Kiirrongidel on madalatel kiirustel keskmine kiirendus madalam võrreldes pendelrongiga, kuid suurematel kiirustel kõrgem kiirendusvõime. Rongide lubatud kiirendus on vahemikus 1-1,5 m/s² [1].

Erinevatel rongi liikidel, mis on reisirong, kaubarong või universaalvedur, on erinevad veojõu karakteristikud. Allpool on toodud võrdlemiseks mõned tüüpilised rongiliikide veojõu karakteristikud.

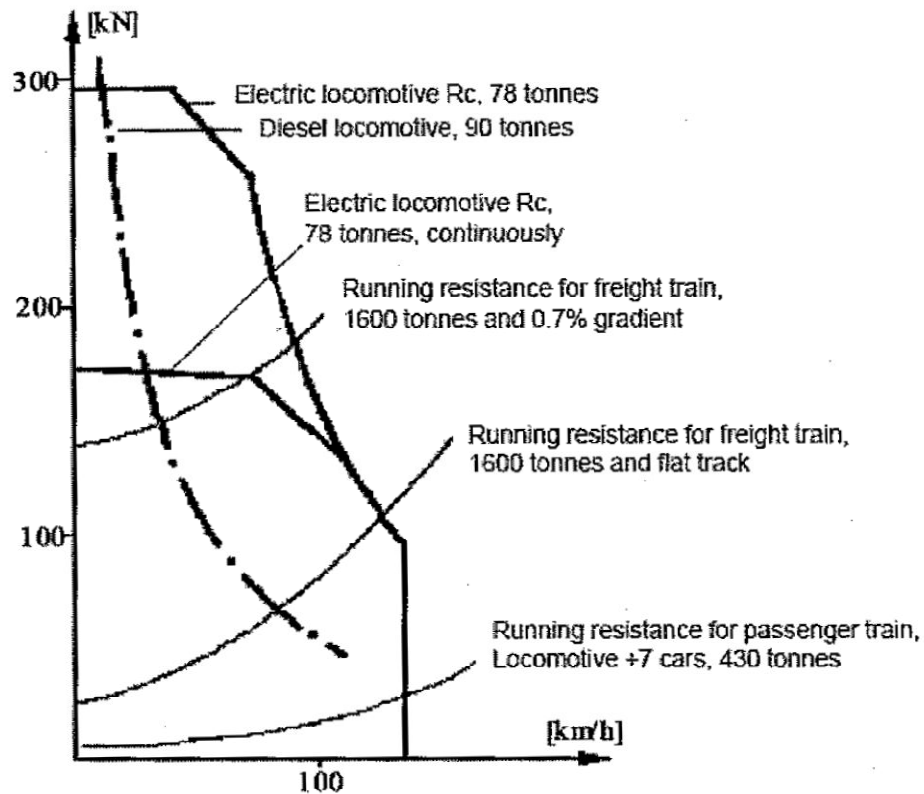
Esiteks antakse allpool joonisel 3.7 Tšehhoslovakkias toodetud reisiringi veduri ЧС4 veojõukarakteristik. ЧС4 vedurit kasutatakse 25 kV AC elektriraudteedel. ЧС4 veduril kasutati takistitega veojõu reguleerimist, mille astmete järjekorranumbrid on esitatud joonisel. Viimasel astmel on olemas lisareguleerimise võimalus mootori välja nõrgendamise (ослабление поля), mis on märgistatud joonisel ОП1...ОП5 [39].

Karakteristikul on veojõudu esitatud ühikuga кгс ehk kilogrammjõud kgf, kus $1 \text{ kgf} = 9,807 \text{ N}$. Antud veojõu mõõdühikut kasutatakse laiali venekeelsetes raamatutes.



Joonis 3.7. Tšehhoslovakkia reisiringi ЧС4 veojõu karakteristik [39]

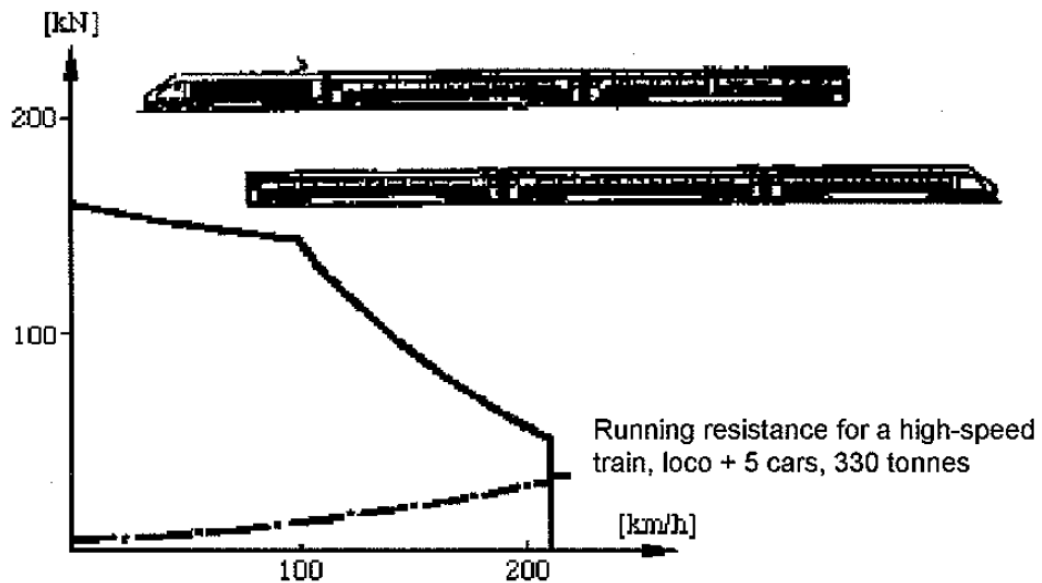
Teiseks vaadeldakse Rootsi universaalveduri Rc veojõu karakteristikut (vt. joonis 3.8). Universaalveduri Rc pidev võimsus on 3,6 MW ning toitesüsteem on AC 15kV 16 2/3 Hz. Veojõu karakteristikul on esitatud mõlemad pideva ning maksimaalse koormuse jooned. Lisaks veojõu karakteristikule on toodud ka liikumise takistused tüüpilisele kaubarongile ning reisiringile. Võrdlemiseks on toodud ka diiselleduri veojõukarakteristik, kust on näha, et diiselleduril on võrreldes elektriveduriga madal maksimaalne veojõud suurtel kiirustel. Seega diiselledur sobib hästi väikestel kiirustel tõusu ületamiseks, kuid suurte kiirustel on kiirendusvõime piiratud [1].



Joonis 3.8. Rootsi universaalveduri Rc veojõu ja liikumise takistuste karakteristik [1]

Edasi vaadeldakse kiirrongi veojõukarakteristikut Rootsi X2000 kiirrongi näidisel (vt. joonis 3.9). Kiirrongi X2000 pidev võimsus on 3,3 MW ning toitesüsteem on AC 15kV 16 2/3 Hz. Kiirrongide veojõukarakteristik koostatud põhimõttega, et võimaldada keskmist algiirendust ning suurt kiirendust kõrgematel kiirustel. Sellega saavutatakse maksimaalsed reisimiskiirused mõistliku aja jooksul ning tagatakse reisijate mugavus. Kiirrongid on varustatud võimsamate ajamitega, ning võrreldes universaalrongiga on kiirrongil vähendatud kaalu ja aerodünaamilist takistust [1].

Näiteks X2000 kiirrongil on vedur ning 5 vagunit kogumassiga 330 tonni, aga universaalveduril Rc on vedur ja 7 vagunit kogumassiga 430 tonni, seejuures masside erinevus on ca 25 %. Samal ajal universaalveduri maksimaalne veojõud on 290 kN ning kiirrongi maksimaalne veojõud on ca 160 kN, seega on erinevus ca 45 %.



Joonis 3.9 Rootsi X2000 kiirrongi veojõu ja liikumise takistuse karakteristik [1]

3.2.2. Pidurduskarakteristik

Pidurdamist kasutatakse kas rongi peatamiseks või kiiruse piiramiseks näiteks kaldteel või enne pööramist. Veduritel kasutatakse kahte pidurdussüsteemi- mehaanilised ja elektrilised. Pidurdamist väljendatakse graafiliselt pidurduskarakteristiku kaudu, kus on näidatud pidurdusjõu B sõltuvus kiirusest v .

Nagu kiirendamisel, nii ka pidurdamisel peavad olema arvesse võetud ka reisijate mugavus. Seega on olemas ka pidurdamisel maksimaalne pidurduskiirendus. Rongide lubatud pidurduskiirendus on vahemikus $0,9-1,1 \text{ m/s}^2$. Vabasõidul pidurduskiirendus on orienteeruvalt $0,1 \text{ m/s}^2$ [1].

- **Mehaaniline pidurdamine**

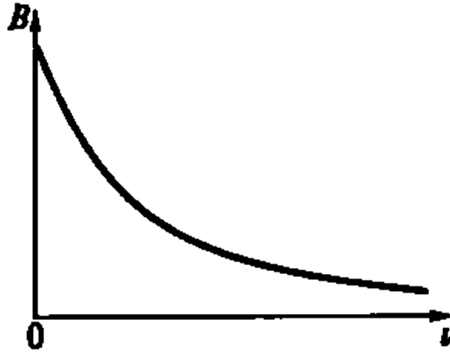
Mehaanilisel pidurdamisel pidurdusjõud tekib tänu hõõrdejõule kahe kokkupuutuva pinna vahel. Enim levinud on rataste-klotside pidur, kus pidurdamine toimub hõõrdejõu tekitamisel klotsi surumisega ratta vastu. Rongi pidurdusjõudu B mehaanilisel pidurdamisel saab avaldada valemiga [3]:

$$B = \sum K \cdot \varphi_k \quad (3.14)$$

kus K – klotsi surumise jõud, N

φ_k – ratta ja klotsi vaheline hõõrdetegur, sü

Hõõrdetegur φ_k sõltub pindade materjalist ning üldjuhul väheneb kiiruse suurenemisel. Seega pidurdamise karakteristik $B = f(v)$ on langev kõver (vt. joonis 3.10). Antud pidurdamise süsteemi kasutegur on väike suurtel kiirustel ning seda kasutatakse üldjuhul rongi lõplikuks peatamiseks.



Joonis 3.10 Mehaanilise pidurdamisel pidurduskarakteristik [3]

- **Elektriline pidurdamine**

Elektriline pidurdamine on selline talitusviis, kus veomootorid lülitatakse ümber generaatori režiimi. Generaatori pööramiseks on vajalik jõumoment tekitab ratasel pidurdusjõu ning generaatoris muundatakse rongi inertsijõud elektrienergiaks.

Võrreldes mehaaniliste pidurdamisega on elektrilisel pidurdamisel eelised: puudub piduriklotside kuumendus, suureneb pidurdussüsteemi töökindlus, vähendatakse hoolduskulusi pidurdusklotside kulumise vähendamisega. Elektrilise pidurdamise puudus seisneb selles, et pidurdatakse ainult veoratastega, mis vähendab maksimaalset pidurdusjõudu. Elektrilist pidurdamist kasutatakse laialt elektrirongidel [39]. Eristatakse elektrilist regeneratiivset pidurdamist ning pidurdamist takistitega.

- **Regeneratiivne pidurdamine**

Regeneratiivsel pidurdamisel veomootorid talitlevad generaatorina, kus toodetud elektrienergia edastatakse elektrivõrku. Seda energiat tarbitakse samas kontaktvõrgus olevate vedurite poolt või antakse toitevõrku. Samuti on võimalik seda elektrienergiat edastada veduril paiknevale energiasalvestile, et seda hiljem kasutada.

Rongi pidurdusjõudu B regeneratiivsel pidurdamisel saab avaldada valemiga [3]:

$$B = 3,6 \cdot E_{reg} \cdot I_{reg} + \Delta B \quad (3.15)$$

kus E_{reg} – regeneratiivsel talitusel mootori elektrimootorjõud, V

I_{reg} – regeneratiivsel talitusel voolutugevus, A

ΔB – pidurdusjõu komponent, kgf

Rongi pidurdusjõu komponendi ΔB regeneratiivsel pidurdamisel saab avaldada valemiga [3]:

$$\Delta B = 3,6 \cdot \frac{\Delta P_{meh} + \Delta P_{mag} + \Delta P_{ük}}{v} \quad (3.16)$$

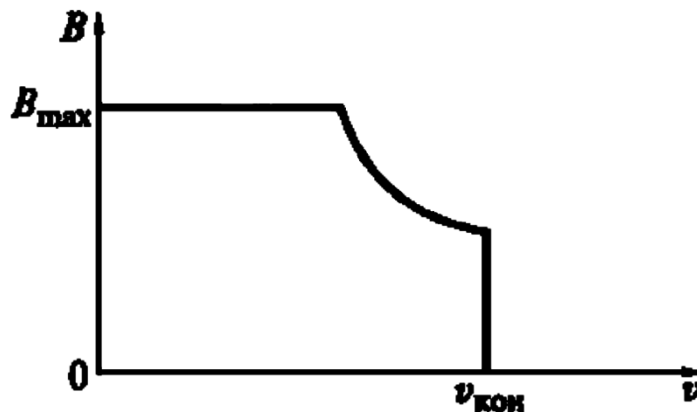
kus ΔP_{meh} – mootori mehaanilised kaod, $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$

ΔP_{mag} – mootori magnetilised kaod, $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$

$\Delta P_{ük}$ – ülekandesüsteemi kaod, $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$

v – rongi liikumise kiirus, m/s

Allpool joonisel 3.11 on esitatud regeneratiivse pidurdamise karakteristik $B = f(v)$. Sõltuvalt mootori ergutussüsteemist võib pidurduskarakteristik erineda veduriti. Regeneratiivsel pidurdamisel on pidurdamiskarakteristik piiratud rongi konstruktiivse kiirusega v_{kon} ning maksimaalse pidurdusjõuga B_{max} . Vastavalt graafikule on selge, et regeneratiivset pidurdamist kasutatakse edukalt nii kiiruse piiramiseks, kui ka peatamiseks.

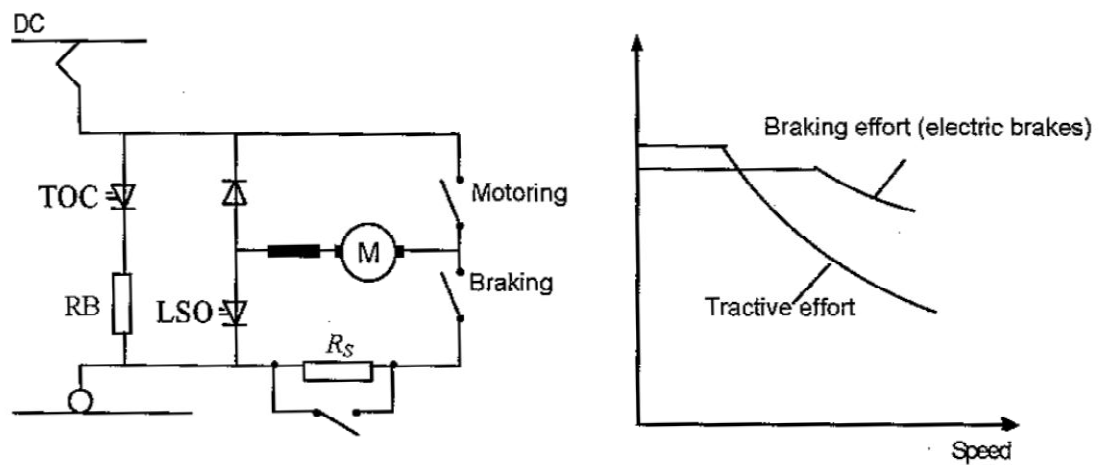


Joonis 3.11 Regeneratiivsel pidurdamisel pidurduskarakteristik [3]

Regeneratiivne pidurdamine on ebasoovitav maksimaalsetel kiirustel täis mahus, kuna kontaktvõrgus võivad tekkida suured pinged kõikumised. Regeneratiivne pidurdamine on soovitatav pideva pidurdamise korral, millega vähendatakse genereeritava võimuse maksimumi ning pikendatakse genereeritavat perioodi. Seda on võimalik saavutada kiiruse, mootori voolu, pinged ja rataste libisemise juhtimisega [1].

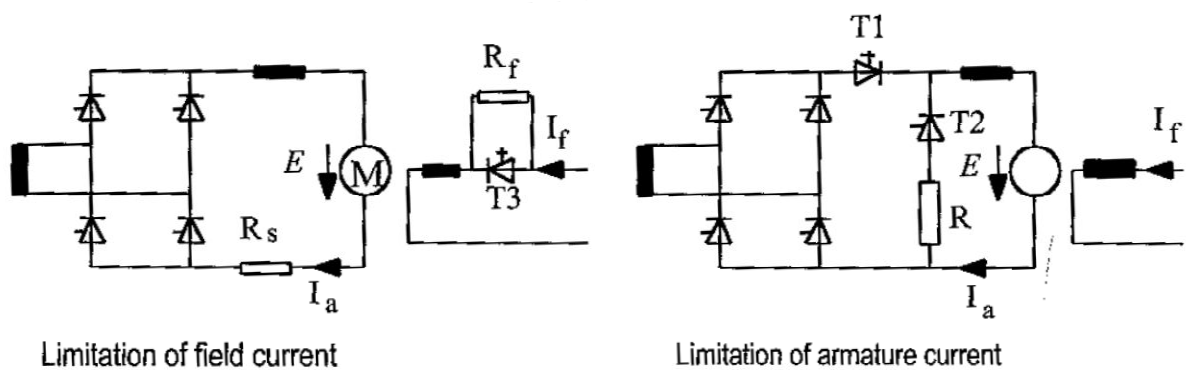
Regeneratiivsel pidurdamisel edastatava energia kogus sõltub kontaktvõrgu võimalustest. Juhul kui kontaktvõrgu vastuvõtlikus on ebapiisav, siis pinged liinis tõuseb ning elektriline pidurdamine lakkab. Sellel juhul tuleb kasutada lisatakistust, mis kustutab liigset genereeritud võimsust. Allpool joonisel 3.12 on toodud skeem, kus on näidatud pidurdamistakisti lisamine, ning graafik, kus on näidatud tarbitava ja genereeritava võimsuste võrdlus. Genereeritavat suurendatavat võimsust on võimalik reguleerida, muutes mootorile rakenduvat pinget. Selleks pannakse

jadatühenduses lisa pidurdustakisti (R_s). See võimaldab mootori pinget tõsta. Lisatakistus ühendatakse lahti kui mootori pinge on väiksem kui kontaktvõrgu pinge. [1]



Joonis 3.12 Regeneratiivsel pidurdamisel suurte voolude piiramine [1]

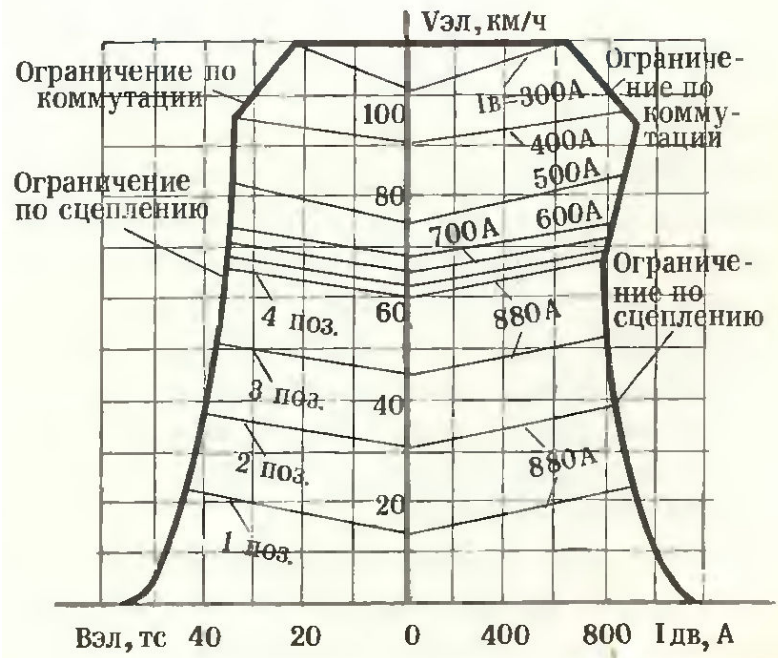
Regeneratiivseks pidurdamiseks peab veduri ajamis olema kasutatud lülitavatavaid pooljuhtseadmeid, näiteks türistore (vt. joonis 2.9). Genereerimisel võib tekkida olukord kui AC võrgu pinge ja mootori pinge mõjutavad üksteist, mille tulemusel võib tekkida liigvool. Suure voolu piiramiseks võib kasutada kahte lahendust, mis on esitatud allpool joonisel 3.13. Selleks paigaldatakse lisatakisti kas ankru või välja ahelasse.



Joonis 3.13 Regeneratiivsel pidurdamisel ajamis tekkivate suurte voolude piiramine [1]

Allpool joonisel 3.14 on toodud veduri BJI80^P pidurduskarakteristik. BJI80^P kasutati NSV liidus kaubarongi vedurina kontaktvõrkudes sagedusega 50 Hz ning nimipingega 25 kV. Elektrivedur BJI80^P on varustatud regeneratiivse pidurdussüsteemiga. Kasutades ainult regeneratiivset pidurdussüsteemi on elektrirongi pidurdustee 2000 - 4000 m sõltuvalt massist ning pidurdamise algkiirusest. Seega antud pidurdussüsteemi kasutatakse juhul kui pidurduskoht on ette teada. On

ette nähtud muunduri vastuelektromotoorjõu nelja tsooniline reguleerimine, mis saavutatakse vastavate juhtimisimpulsside saatmisega türistormuundurile. Joonisel on tsoonid märgitud "поз.". Kuni kiiruseni v 100 km/h pidurdusjõudu B piirab maksimaalne hõõrdetakistus. Kiirustel enam kui 100 km/h pidurdusjõudu suurendamist keelavad piirangud kommutatsiooni järgi [59].



Joonis 3.14 Regeneratiivse pidurdamisega VL180^P veduri pidurduskarakteristik [59]

Vastavalt pidurduskarakteristikule on regeneratiivne pidurdamine efektiivne kõikidel kiirustel ning seda saab kasutada rongi täieliku peatuseni [56].

- **Takistitega pidurdamine**

Regeneratiivse pidurdamise põhiline puudus seisneb selles, et elektrivõrk ei ole alati võimeline vastu võtma regeneereeritud võimsust. Algselt katsetati lahendusega, kus liigse regeneereeritud võimsuse tarbimiseks paigaldati suured, vastavalt vajadusele lülitatavad, takistid kontaktvõrgu toitealajaamadesse. Sellel lahendusel on omad puudused, kuna see oli keeruline ning vähe töökindel.

Seega kasutati takisteid, mis paigaldati rongi peale, mille tulemusel saavutati pidurdamine takistitega. Juhul kui kasutatakse pidurdamist takistitega, siis lülitatakse veomootorid välja kontaktvõrgust ning ühendatakse pidurdustakistitega. Seega muundatakse liikuva rongi mehaaniline energia esiteks elektrienergiaks, ning kohe muundatakse soojusenergiaks, mis eraldub pidurdustakistitest. Pidurdustakistid lülitatakse välja astmeliselt, nagu kiirendamisel takistitega reguleerimise korral.

Rongi pidurdusjõudu B pidurdamisel takistitega saab avaldada valemiga [3]:

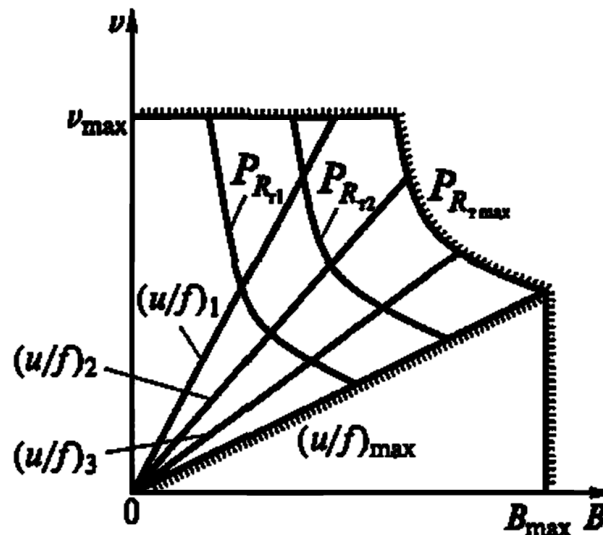
$$B = 3,6 \cdot E_{tak} \cdot I_{tak} + \Delta B \quad (3.17)$$

kus E_{tak} – takistitega pidurdamisel mootori elektrimootorjõud, V

I_{tak} – takistitega pidurdamisel voolutugevus, A

ΔB – pidurdusjõu komponent, mis sõltub mootori mehaanilistest ja magnetilistest kadudest (vt. valem 3.16), kgf

Allpool joonisel 3.15 on toodud asünkroonmootori takistitega pidurduskarakteristik. Asünkroonmasina pidurdusjõu sõltuvus kiirusest on määratud pinge sõltuvusega sagedusest. Joonisel on toodud piirangud konstruktiivse kiiruse järgi (v_{max}) ning maksimaalse pidurdusjõu järgi (B_{max}). Joonisel on esitatud ka võimsused erinevate, pidurdustakistite väärtustel (P_{R_t}). Maksimaalne pidurdustakisti moodustub pidurdusjõu piirangu takisti võimsuse järgi ($P_{R_t max}$). Joonisele on lisatud ka pinge sõltuvus sagedusest (u/f). Pinge ja sageduse maksimaalne suhe moodustub omaette piirjoone.

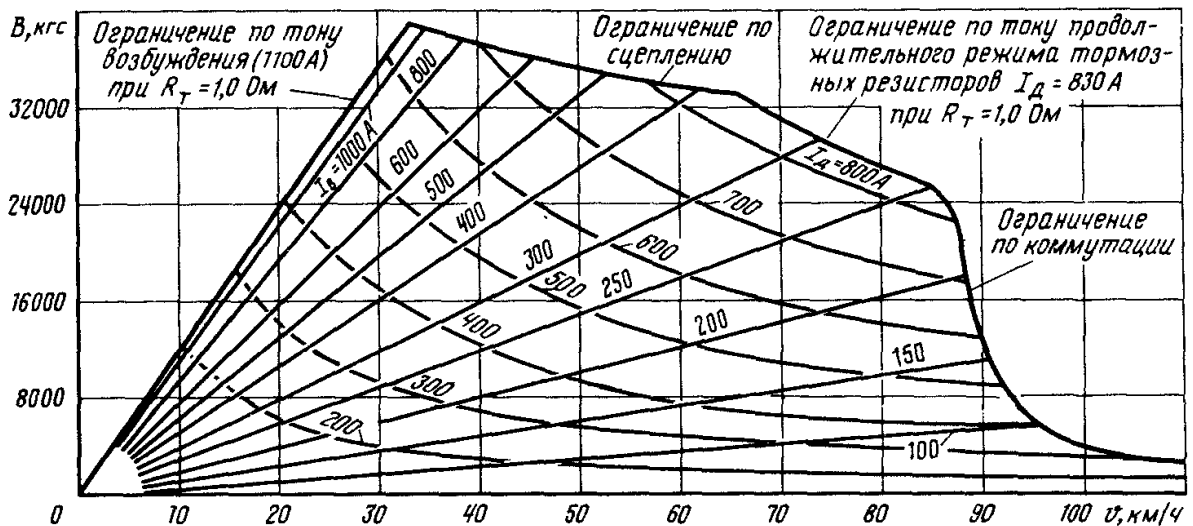


Joonis 3.15 Asünkroonmootori takistitega pidurduskarakteristik [3]

- **Dünaamiline pidurdamine**

Kasutatakse ka kahe pidurdussüsteemi kombinatsiooni, mida nimetatakse dünaamiliseks pidurdussüsteemiks. Antud süsteemi põhimõtte seisneb selles, et juhul kui kontaktvõrgusüsteem on võimeline tarbima regenereeritavat võimsust, siis kasutatakse regeneratiivset pidurdamist. Vastasel juhul lülitatakse sisse takistitega pidurdamine [51].

Allpool joonisel 3.16 on toodud veduri БЛ80^T pidurduskarakteristik. БЛ80^T kasutati NSV liidus kaubarongi vedurina kontaktvõrkudes sagedusega 50 Hz ning nimipingega 25 kV. Veduri pidev võimsus on 6,2 MW ning konstruktiivne kiirus 110 km/h [38].



Joonis 3.16 Veduri ВЛ80^T takistitega pidurduskarakteristik [38]

Vastavalt joonisele kiirusel kuni 35 km/h pidurdusjõud on piiratud ergutusvooluga I_B . Kiiruste vahemikul 35 kuni 65 km/h pidurdusjõud on piiratud maksimaalse hõõrdejõuga. Kiiruste vahemikul 65 kuni 85 km/h pidurdusjõud on piiratud pidurdustakistite maksimaalse vooluga I_D pideva pidurdamise režiimil. Kiirustel enam kui 85 km/h pidurdusjõudu suurendamist keelavad piirangud kommutatsiooni järgi.

Vastavalt pidurduskarakteristikule saavutatakse suhteliselt suur pidurdusjõud kiiruste vahemikul 20 kuni 85 km/h. Sellest vahemikust väiksematel ja suurematel kiirustel pidurdusjõud väheneb järsult.

Teiste NSVL liidus kasutatud vedurite pidurduskarakteristikud on esitatud allikates [59,38].

3.2.3. Energiatarbimine

Veduri elektrienergia tarbimine koosneb põhiliselt veoajami ning abi- ja omatarbeahelate elektritarbimisest, millele lisanduvad ka energiakaod trafos ning muundurites. Juhul kui on kasutatud regeneratiivset pidurdussüsteemi, siis sellest lahutatakse genereeritud energia. Allpool toodud valemiga saab avaldada veduri tarbitavat elektrienergiat W [3]:

$$W = W_a + W_m + W_{ot} - W_{reg} \quad (3.18)$$

kus W_a – veoajamiga elektrienergia tarbimine, kWh

W_m – elektrienergia muundamisega seotud kaod, kWh

W_{ot} – abi- ja omatarbeahelate elektrienergia tarbimine, kWh

W_{reg} – regeneratiivse pidurdamise poolt genereeritud elektrienergia, kWh

Veojami elektrienergia tarbimine sõltub veojami veojõust F (vt. valem 3.1). Veojõud omakorda sõltub põhiliselt rongi massist, liikumise kiirusest ja kiirendusest (vt. valem 3.2). Vedurid projekteeritakse vastavalt ettenähtud nimimassile ja nimikiirusele, kuna nimiandmete juures on maksimaalne veojami kasutegur (vt. joonis 3.6). Veduri energia tarbimine on minimaalne püsikiirusel ning maksimaalne kiirendamisel (vt. joonis 3.4). Samuti energia tarbimist mõjutavad ka teised tegurid. Need on trassi kurvi raadius, trassi kõrguste vahe (tõus, langus), tuule kiirus ning suund, rongi välispindala ja aerodünaamilised omadused (vt. valem 3.5).

Juhul kui on teada veduri kiiruse sõltuvus voolust $v = f(I)$, siis saab veojami elektrienergia tarbimise arvutada järgmise valemiga [39]:

$$W_a = \frac{U \cdot \sum I_{kesk} \cdot \Delta t}{60} \quad (3.19)$$

kus I_{kesk} – veojami aktiivvoolu väärtus ajaühiku Δt jooksul, A

Regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutusel saab elektrienergia tarbimise arvutada järgmise valemiga [39]:

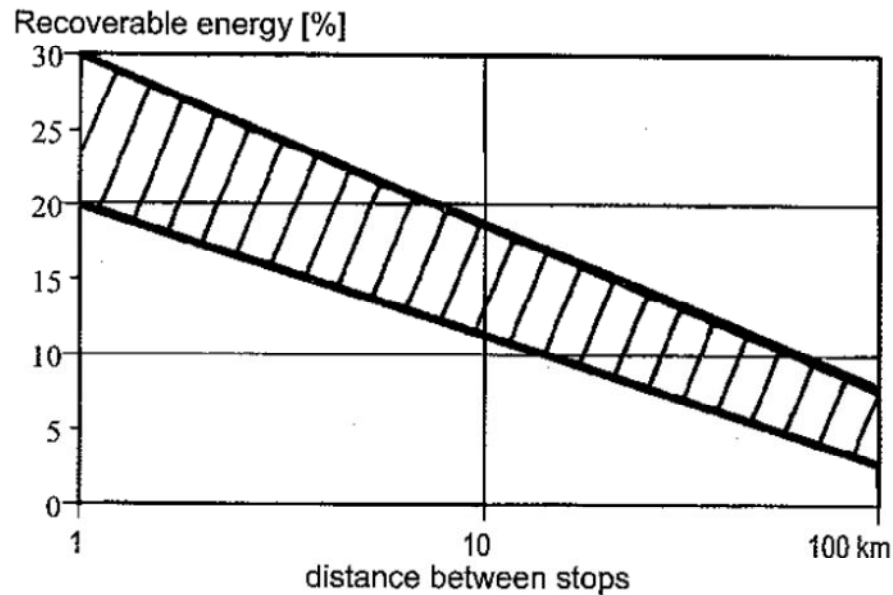
$$W_a = \frac{U}{60} \cdot \left[\left(\sum I_{kesk} \cdot \Delta t \right)_{tõmme} + \left(\sum I_{kesk} \cdot \Delta t \right)_{pid} \right] \quad (3.20)$$

Elektrienergia muundamise kaod sõltuvad trafo ja muundurite tüüpidest ning juhtimisest. Abi- ja omatarbeahelate elektrienergia tarbimine sisaldab elektrienergiat, mida kasutatakse valgustamiseks, kütmiseks, jahutamiseks, juhtimisahelate toiteks jne. Need sõltuvad ka rongi tüübist ning reisirongi puhul ka pakutavast mugavuse klassist.

Täpsed valemid veduri energia tarbimiseks on esitatud allikas [39], kus peale rongi lähteandmeid, mis on mass ja iga koostisosa kasutegurid, on määravad iga tee lõigul valitud liikumise kiirus, kiirendus ning tee kalded.

Tervikliku energia tarbimise seisukohast sõltub regeneratiivsel pidurdamisel toodetud energia suurel määral peatuste vahekaugustest. Regeneratiivsest pidurdamisest saadava kasu leidmiseks arvutatakse regeneereeritud energia hulk protsendina tarbitud energiast. Väiksematel peatuste vahekaugustel regeneratiivse pidurdamise efekt on kõige suurem, seega antud pidurdusviis on levinud metroodes. Suurte peatuste vahekauguste puhul annab regeneratiivne pidurdamine väikest energiasäästu. Regeneratiivse pidurdamise efekt on suhteliselt suur juhul kui trassil on suured kõrguste vahed. Sellel juhul on suurem osa energiast regeneereeritud allamäge sõidu ajal [1].

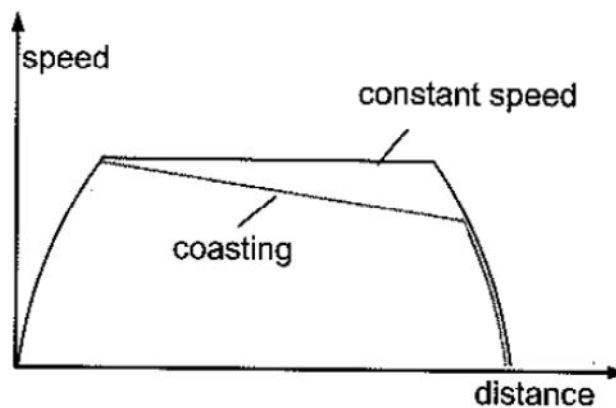
Allpool joonisel 3.17 on toodud suhtelise genereeritava energia ning peatuste vahekauguste sõltuvus. Maksimaalne suhteline regenereeritud energia on 20 kuni 30%, kus peatuste vahekaugus on 1 km. Peatuste vahekaugusel 100 km suhteline regenereeritud energia on all 8% tarbitud energiast.



Joonis 3.17 Kiirrongi veojõu sõltuvus kiirusest [1]

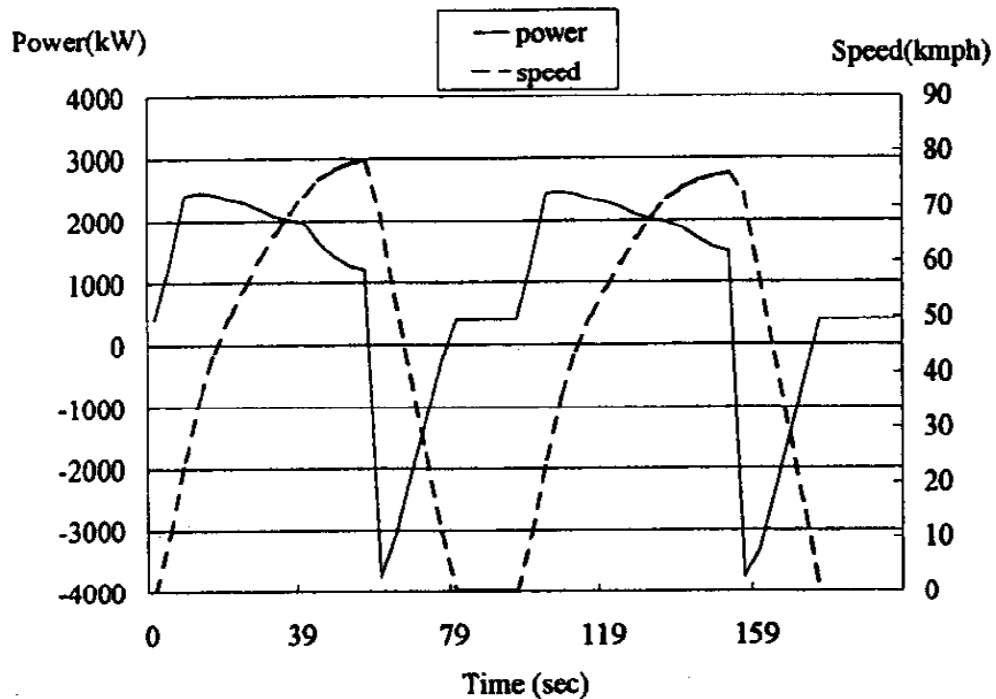
Üks traditsiooniline viis tarbitava energia vähendamiseks on mootori lahtiühendamine rataste pöördevõllist, mida nimetatakse vabasõiduks (*coasting*). Et saavutada maksimaalset kasutegurit vabasõidust kasutatakse seda enne pidurdamist, kuna vabasõidul tasasel pinnal liikumise kiirus langeb. Tavaliselt enne vabasõidu režiimi saavutatakse maksimaalne kiirus. Antud viisi efektiivsus ei ole märkimisväärne regeneratiivse pidurdamise kasutamisel, sest vabasõidu tõttu suurendatakse reisimisaega [1].

Allpool joonisel 3.18 on esitatud vabasõidu kasutamise näidis.



Joonis 3.18 Vabasõidu kasutamise näidis [1]

Konkreetse raudtee trassi või selle lõigu jaoks on võimalik koostada graafik tarbitava võimsuse kulu reisimisaja suhtes. Elektrienergia tarbimise seisukohast see on koormusgraafik, mis kõige parimini esitab koormuse tunnusjoont. Kuna liikumisel tarbitav võimsus on otseselt seotud reisimiskiirusest, siis tarbimisprotsesside selgitamiseks lisatakse graafikusse ka kiiruse sõltuvus reisimisajast. Elektrirongi näidiskoormusgraafik, kus on kasutusel regeneratiivne pidurdamissüsteem, on esitatud allpool joonisel 3.19.



Joonis 3.19 Veduri võimsuse tarbimise ja kiiruse graafik [60]

Graafikul pidevjoon näitab tarbitud või genereeritud elektrienergiat, ning katkendjoon näitab reisimiskiirust.

Antud graafikul on näha paljud raudtee liikumise põhimõtted. Näiteks energiatarbimise seisukohast on võimalik kiirendamise protsessi jagada põhiliselt kolmeks osaks. Esimene osa on nullist kuni poole maksimumi võimsuseni. Sellel lõigul tarbitav võimsus on praktiliselt lineaarselt seotud kiirusest. Teine ja kolmas osa on poolest maksimum kiirusest kuni maksimum kiiruseni. Sellel lõigul tarbitav võimsus kiirendamisel on pöördvõrdeline kiirusega, ehk kiiruse suurendamisel tarbitav võimsus väheneb. Sama tendents on nähtav ka kiirendus karakteristikutel, mis on esitatud peatükis 3.2.1.

Maksimaalsel kiirustel ei anna regeneratiivne pidurdamine maksimaalset tulemust, aga ca 80-90% maksimaalsest kiirusest annab maksimaalse genereeritava võimsuse. Peale maksimumi

algab regenereeritava võimsuse järsk vähendamine kuni peatuseni. Kirjeldatud käitumine vastab täiesti pidurduskarakteristikule, mis on esitatud ülalpool (vt. joonis 3.15).

Tuleb pöörata tähelepanu sellele, et reisirongidel isegi peatuste ajal on olemas tarbimine. Seda on vajalik arvestada elektrienergia tarbimise arvutamisel.

Elektriraudtee energiatarbimine on võrreldes teiste kaugveo transpordivahenditega madal. Erinevaid transpordivahendite energiatarbimisi saab võrrelda juhul kui võetakse arvesse tarbitud energia kogus (kWh), mis on kulutatud kas ühe reisija või kauba ühiku vedamiseks ühe kilomeetri kaugusele. Allpool on toodud tabel 3.1 kus on toodud erinevate transpordivahendite energiatarbimine. Elektriraudteel on võrreldes reisibussiga kaks korda ning võrreldes lennukiga vähemalt kuus korda väiksem energiatarbimine. Seega majanduslikult on energiatarbimise seisukohast elektriraudtee transport säästlik.

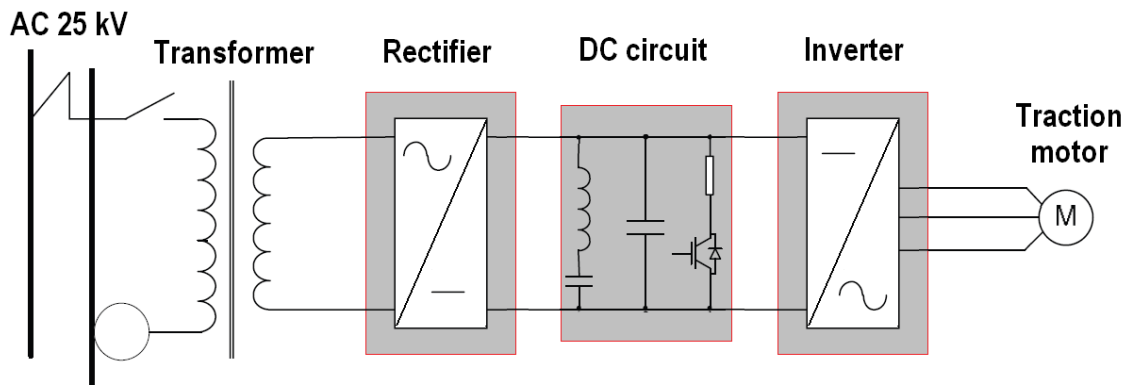
Tabel 3.1 Kaugveo transpordi energiatarbimise võrdlus [1]

Transport	kWh/reisija-km	Energia liik
Rong 7 vaguniga, maksimaalne kiirus 130 km/h, koormatus 40%	0,1	elekter
Kiirrong 5 vaguniga, maksimaalne kiirus 200 km/h, koormatus 40%	0,1	elekter
Sõiduauto, 5 istekohta, maksimaalne kiirus 110 km/h, koormatus 40%	0,4	bensiin
Reisibuss, koormatus 40%	0,2	diisel
Turbopropellermootoriga lennuk (SAAB 340), teepikkus 400 km, koormatus 60%	0,6	lennukikütus
Reaktiivlennuk (MD 80), teepikkus 400 km, koormatus 60%	1,2	lennukikütus

3.3. Vedurite mudel

Allpool joonisel 3.20 on esitatud 25 kV AC veduri lihtsustatud skeem, mis koosneb veotrafost, alaldist, alalisvoolu vahelulist, vaheldist ning veomootorist.

Vedurit saab modelleerida kahel viisil. Esmalt detailne mudel, kus modelleeritakse detailselt iga veduri elementi võimalikult realistlikul tasemel. Teine viis on koostada lihtsustatud ekvivalentne mudel, kus rakendatakse maksimaalselt aseskeeme ning üksikelementide lihtsustusi.



Joonis 3.20 25 kV AC veduri põhimõtteline skeem [61]

3.3.1. Täielik veduri mudel

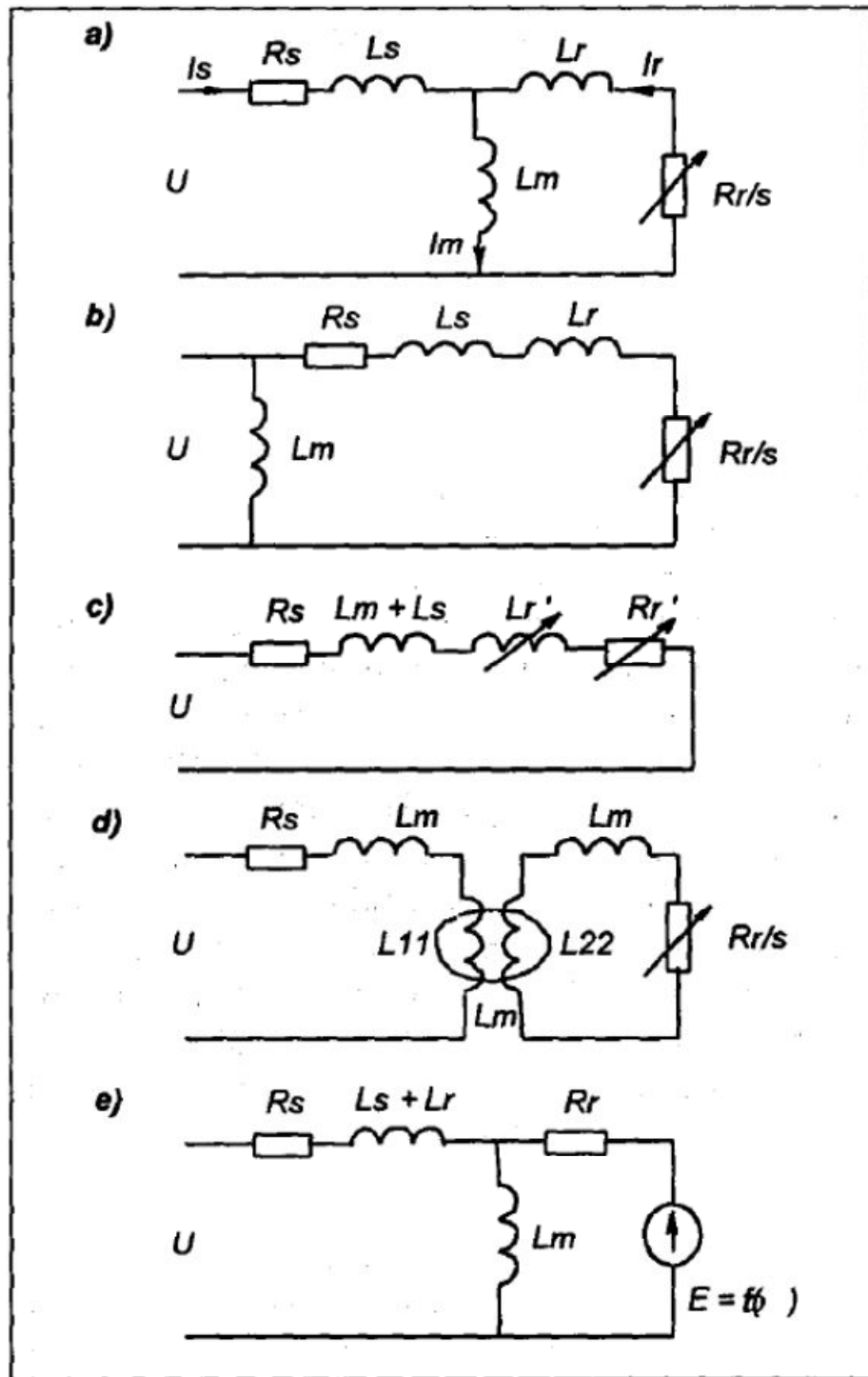
Allpool vaatleme põhjalikumalt veduri põhielementide mudelid.

- **Esimene põhielement on veomootor.**

Veomootor või ka mootor võivad olla modelleeritud kasutades modelleerimise tarkvaras sisseehitatud mootori mudelit. Tavaliselt modelleerimise tarkvaras saab valida mootori tüüpi (AC, DC, sünkroon-, asünkroon- jne) ning seejärel määrata mootori põhiparameetrid. Antud viis on kasutusel, kui olemasolev mootori mudel täpselt juhib uuritava mudeli skeemi, või kui uuritav tulemus ei sõltu mootori ehitusest, näiteks kui mootori talitlust vaadeldakse muutuva koormusena.

Vastasel juhul mootor modelleeritakse lihtelementidest. Kuna tavaliselt uutes vedurites kasutatakse asünkroonmootoreid, siis allpool on vaadeldud just antud lahendust. On olemas erinevad asünkroonmootori aseskeemid, mida edukalt kasutatakse mootorite modelleerimiseks. Tavaliselt kasutatakse ühefaasilise koondparameetritega aseskeeme. Enamus nendest on toodud allikas [62]. Need saab jagada RL, RLE tüübiks, kasutavate elementide (aktiiv-, reaktiivtakistused ning elektrimootorjõud) järgi. Allpool joonisel 3.21 on esitatud asünkroonmootori enimlevinud aseskeemid,

kus R_s – staatori aktiivtakistus
 L_s – staatori induktiivsus
 R_r – rootori aktiivtakistus
 s – libistus
 L_m – magneetimisahela induktiivsus



Joonis 3.21 Asünkroonmootori aseskeemid [62]

Esimesed kaks aseskeemi a) ja b) on laialdaselt kasutatavad [62], ning neid on vaadeldud põhjalikumalt allpool.

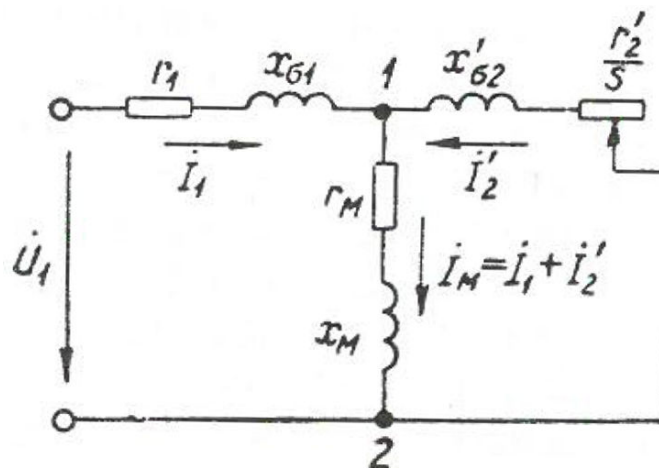
Aseskeem c) kasutatakse tavaliselt suure õhkvaheemikuga mootorites, kuna tulenevalt suurele õhkvaheemikule on primaar- ja sekundaarmähiste vastastikune induktiivsus väikene ning sekundaarsed mõjud võivad olla vaadeldud jadamisiühendatud takistustega [62].

Aseskeeme d) ja e) kasutatakse vaid erijuhtumitel. Aseskeemi e) võib kasutada AC induktsiooni mootorite vektorjuhtimise analüüsimiseks, kus on mootor on vaadeldud elektrimootorjõuna. Antud skeemi saab kasutada nii AC kui ka DC mootorite puhul [62].

Lisaks allikas [63] on toodud mõned asünkroonmootori parameetrite (R_s, R_r, L_s, L_r) näidised ning aseskeemid, milles on arvesse võetud induktsiooni mootori pinnaefekti.

Esimene aseskeem oma kuju järgi on nimetatud T-kujuline. T-kujuline aseskeem peegeldab hästi mootoris toimuvaid füüsikalisi protsesse. T-kujuline aseskeem on esitatud allpool joonisel 3.22,

- kus
- r_1 – primaarahela (staatori) aktiivtakistus
 - $x_{\sigma 1}$ – primaarahela (staatori) puisteinduktiivtakistus
 - r_2 – sekundaarahela (rootori) aktiivtakistus
 - s – libistus
 - $x_{\sigma 2}$ – sekundaarahela (rootori) puisteinduktiivtakistus
 - r_M – magneetimisahela ekvivalentne aktiivtakistus
 - x_M – magneetimisahela ekvivalentne induktiivtakistus

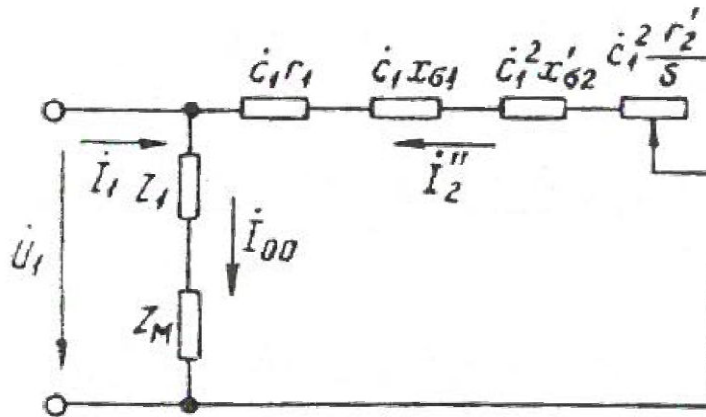


Joonis 3.22 Asünkroonmasina T-kujuline aseskeem [63]

Allpool on toodud alates mõnekilovatisest võimsusest normaalsete asünkroonmasinate aseskeemi suhtelised parameetrid: $r_{1*} \approx r_{2*}' = 0,01 \dots 0,07$; $x_{\sigma 1*} \approx x_{\sigma 2*}' = 0,08 \dots 0,20$; $x_{M*} = 2 \dots 4$; $r_{M*} = 0,08 \dots 0,35$. Suurema võimsusega mootorites on suurem kasutegur ning suhtelised kaod on väiksemad, seega suhtelised aktiivtakistused on väiksemad [63].

Mõningate protsesside uurimiseks on T-kujuline aseskeem ebamugav, kuna skeemi ahelad hargnevad ja pinge paralleelharu klemmidel U_{12} ei ole konstantne, kui pinge sisendklemmidel U_1 on konstantne. Sellel juhul kasutatakse Γ - kujulist aseskeemi [63]. Asünkroonmasina Γ - kujuline aseskeem on toodud allpool joonisel 3.23. Γ - kujulise aseskeemi parameetrite saamiseks

tuleb arvutada vastavad taandamistegur c_1 ning takistus Z_1 . Teisendusteguri c_1 ja takistuse Z_1 arvutusvalemid on toodud raamatus [63].



Joonis 3.23 Asünkroonmasina Γ -kujuline aseskeem [63]

RL aseskeeme on kasutatud erinevates uuringutöodes, nt. [64], [65], [66], [67], [68]. Mõnedes kasutati lihtsustatud aseskeeme, nt. [69], [70], aga erijuhtumitel kasutatakse ka keerukaid aseskeeme, nt. [71]. Uurimistöodes on kasutatud ka RLC aseskeeme, kus induktiivsust C oli kasutatud parasiitmahtuvuse modelleerimiseks, nt. [72], [73].

Uurimistöodes on võrreldud erinevaid asünkroonmasina RL aseskeeme, sealhulgas ka pinnaefekti arvestavaid aseskeeme ning modelleerimise tulemusel tõestavad, et lihtsustatud mudelite kasutamine ei too endaga kaasa tulemuste põhimõttelist muutust [74].

Erinevate tüüpi AC mootorite modelleerimiseks kasutati RLE mootori aseskeemi, nt. [75], [76], [77].

Veel üks võimalus veomootori modelleerimiseks on esitada mootor vooluallikana. Sellist lähenemisviisi uuriti, et ühendada erinevate mootorite sh AC ja DC modelleerimist, ning võimaldada modelleerida mootorite erimudeleid, näiteks kaksiktoitega asünkroonmootor, väljepoolustega mootorid jne [78]. Antud aseskeem ei ole leidnud laia kasutust.

Sõltuvalt kasutatavast modelleerimise tarkvarast, on võimalik koostada ka mootori matemaatilist mudelit. Mootori ja selle muunduri matemaatilise mudeli näidis on toodud [79], [80].

- **Teine põhielement on muundurid.**

Alaldi ja vaheldi põhimõtteskeemid on toodud peatükis 2.5. Tuleb meelis pidada, et need on põhiskeemid. Reaalsed mootori muundurid koosnevad lisaks mõnedest jõuelektroonika komponentidest, mis parandavad signaalide kuju ning vähendavad harmoonikute arvu. Samuti muunduri töö tulemus sõltub suurel määral selle juhtimisest. Elektrivedurites kasutatud

juhtimissüsteem peab taluma kontaktvõrgu pingete kõikumist. Kahjuks reaalse vedurite muundurite skeemid ning nende juhtimissüsteemid pole laialt avaldatud ärisaladuse tõttu.

Erinevate muundurite struktuure ning nende võrdlust harmoonikute tekkimise kohta saab vaadata allikates [81], [82], [83], [84].

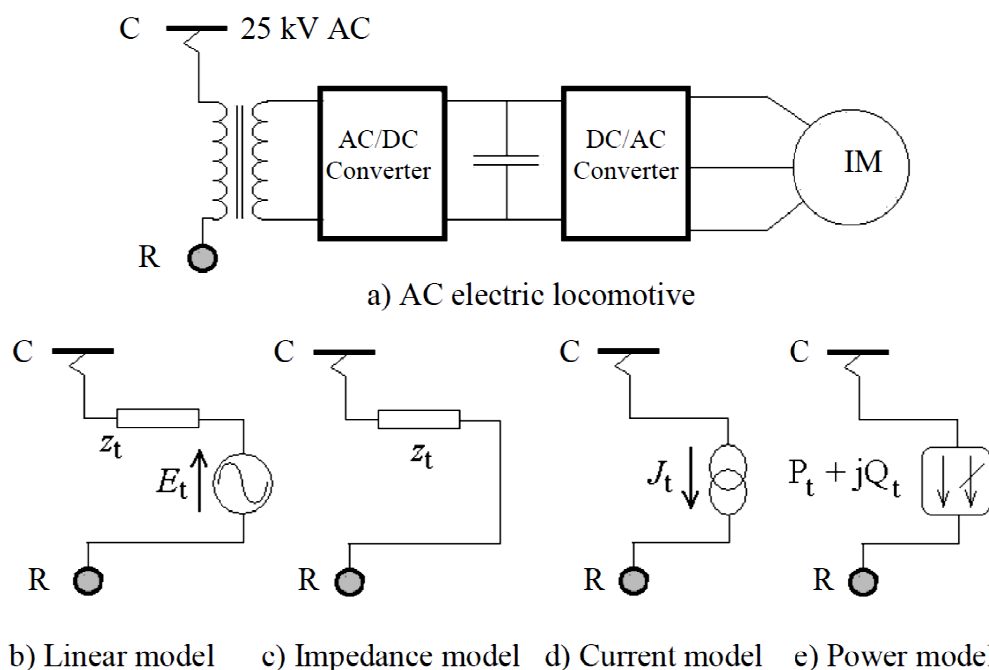
Praktikas kasutatakse ka erinevad meetmed kontaktvõrgu elektrienergia kvaliteedi parandamiseks [85], [86], [87]. Kuna need erimeetmed on seotud kontaktvõrguga, siis käesoleva töö raames neid ei vaadelda.

- **Kolmas põhielement on trafo.**

Veotrafo erineb standartsetest trafodest, mida kasutatakse alajaamades. Need erinevused on määratud erinevate talitlemist tingimustega: primaarpinge suurem kõikumine, vibratsioonide ning tõugete mõju, vertikaalsed ning horisontaalsed kiirendused, lülitusliigpinged[35]. Tavaliselt veotrafodel on mitu primaar- ja sekundaarmähist [1]. Need on siiski vaid konstruktiivsed erinevused ning veotrafo modelleerimisel kasutatakse tavatrafo aseskeeme.

3.3.2. Lihtsustatud veduri mudel

Teine võimalus on vaadelda vedurit üldse, kui üks tarbija. Veduri üldist modelleerimist on võimalik sooritada neljal viisil [88]. Need on lineaarne (*linear*), näivtakistuse (*impedance*), voolu (*current*)- ja võimsuse (*power*) mudelid. Nende lihtsustatud skeemid on esitatud allpool joonisel 3.24. Esimesed kolm mudelit on samad, mida kasutatakse veomootorite modelleerimisel, vt. ülalpool peatükk 3.3.1. Allpool vaadeldakse detailselt iga mudel eraldi.



Joonis 3.24 Veduri modelleerimise mudelid [88]

- **Lineaarne mudel**

Pinge allikas E_t ja jadaühendatud näivtakistus z_t määratakse kui funktsioon kiirusest, pantograafi pingest ja veojõust terve liikumise intervallis. Sisemise pinge allika faasinurka ei saa otsese meetodiga arvutada, kuna sisemise pinge allika faasinurk peab olema avaldatud alajaama faasinurga kaudu. Seega peale alajaama faasinurga fikseerimist kasutatakse teatmetabelit, et määrata mudeli parameetrid igal aja hetkel, vastavalt veduri liikumise kiirusele, pingele ja veojõule [88].

Modelleerimisel on võimalik kasutada suhtelisi suursi, mida võib alla laadida ning kasutada võimsusvoo arvutamise tarkvaras. Selle mudeli peamiseks puuduseks on andmemahukus, seega tuleb iga veduri kohta valmistada ette modelleerimistarkvaras mahukas andmebaas[88].

- **Näivtakistuse või juhtivuse mudel**

Antud mudel on väga efektiivne, kuna mudelis kasutatakse vaid nelja mõõdetud parameetrit. Näivtakistuse suurus arvutatakse pinge ja voolu suuruste suhte järgi, ning faasinurk lihtsalt määratakse võimsusteguri tõlgendusest [88]. Võrreldes teiste mudelitega on see mudel lihtsasti kasutatav, kuna ei vaja suurt andmebaasi ning arvutusressursse. AC veduri modelleerimist takistusena, on täpsemalt käsitletud järgmises kirjandusallikas [89].

- **Voolu mudel**

Juhitaval vooluallikal põhinev voolu mudel on raskesti rakendatav kui on teadmata faasinihkenurk. Sarnaselt lineaarsele mudelile kasutatakse mahukat andmebaasi, kus on salvestatud mudeli parameetrid iga kiiruse, pantograafi pinge ja veojõu jaoks. Iga modelleerimise ajahetke tarbeks võetakse mudeli parameetrid teatmetabelist [88].

AC vedur modelleerimist muutuvate parameetritega AC voolu allikana on käsitletud järgmistes kirjandusallikates [90,91].

- **Võimsuse mudel**

Antud mudelit kasutatakse laialt kolmefaasilise võimsusvoo uuringutes ning modelleerimises. Mudeli parameetrite arvutamiseks kasutatakse veduri veojõu sõltuvust kiirusest. Veduri veojõu sõltuvus kiirusest arvutatakse ümber mudeli parameetriteks, kasutades Newtoni liikumisseadust, vastavalt liikumise parameetritele [88].

Antud mudeli kasutamisel võib tekkida probleem, juhul kui on teadmata veduri veojõu sõltuvus kiirusest. Samuti antud mudel sobib vaid koormusvoogude uurimiseks.

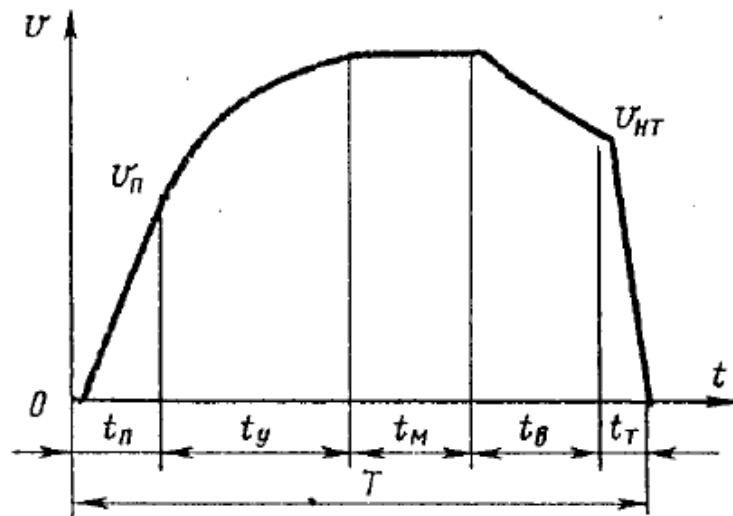
3.4. Vedurite modelleerimine

Vedurite modelleerimiseks tuleb valida modelleerimiseks sobiv mudeli tüüp, ning vastavalt valikule määrata mudeli parameetrite muutus ajas. Tavaliselt modelleerimine ei hõlma kogu liikumise piirkonda, kuna see vajab liiga palju arvutusvõimsust ning arvutusaega ja samal ajal annab palju mittevajalikke tulemusi. Seega modelleeritakse vaid põhilisi veduri töörežiime.

- **Modelleerimisel vaadeldavad veduri töörežiimid**

Veduri töörežiimid sõltuvad liikumise kiiruse muutusest ajas ehk liikumise graafikust. Allpool joonisel 3.25 on toodud põhimõtteline liikumise graafik, kus liiklus on jagatud aladeks vastavalt veduri töörežiimidele.

Vastavalt joonisele rongi liikumine alates liikumise alustamisest kuni peatuseni saab jagada viieks osaks. Esimesel ajavahemikul t_n toimub kiiruse järsk suurendamine. Teisel ajavahemikul t_y kiirendamine väheneb kuni ettenähtud kiiruse saavutamiseni. Kolmandal ajavahemikul t_M rong liigub ühtlasel kiirusel. Neljandal ajavahemikul t_B kasutatakse vabasõitu, kus rong liikumine aeglustub. Viimasel ajavahemikul t_T rong pidurdab kuni peatumiseni.



Joonis 3.25 Rongi liikumise režiimid [37]

Seega rongi liikumist saab jagada viieks režiimiks: järsk kiirendamine, sujuv kiirendamine, liiklus ühtlase kiirusega, vabasõit ning pidurdamine.

Liikumise töörežiimist sõltub selleks vajalik veojõud, millest oleneb omakorda energia tarbimine. Kiirendusel rakendatakse maksimaalset veojõudu. Pidurdamisel tarbitav energiakogus sõltub pidurdamise süsteemist. Kasutades regeneratiivset pidurdamist genereeritakse energia ning edastatakse tagasi võrku (vt. peatükk 3.2.2).

Kasutades veduri veojõu karakteristikut (veojõu sõltuvus kiirusest) saab leida vajaliku veojõudu. On kasutusel ka liikumise modelleerimise tarkvara, mis leiab vajaliku veojõu väärtused ettemääratud rongi liikumise režiimi jaoks [92].

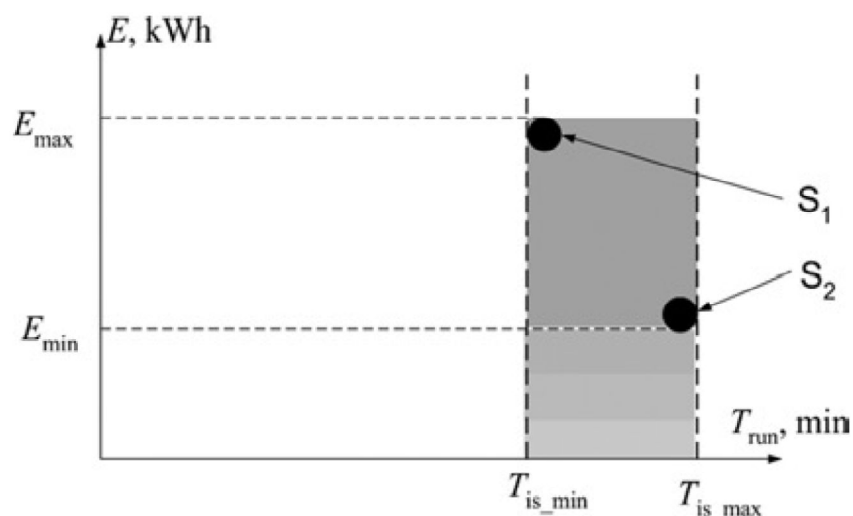
Veojõudu saab teisendada veduri poolt tarbitavale energiale, kasutades veduri kasuteguri. Vastavalt saadud tarbitavale energia koostetakse koormusgraafik.

- **Mitme rongi liikumine ühe alajaama piirkonnas**

Modelleerimisel tuleb pöörata tähelepanu, et mitu rongi võivad liikuda ühe veoalajaama piirkonnas. Juhul kui ühes elektriraudtee kontaktvõrgu osas, mida toidetakse ühest veoalajaamast, liigub rohkem kui üks vedur, siis nende summaarse mõju avaldamiseks võib kasutada üht ja sama liikumise mudelit, mis käivitatakse vastava ajaviitega. Juhul, kui rongide arv on teadmata, ning see sõltub paljudest oludest, siis rongide summaarse mõju avaldamiseks võib kasutada Monte Carlo simulatsiooni, kuna summaarne tarbitav vool on juhuslik tulemus, mis on summa vedurite vooludest [93]. Samuti on koostatud mitme rongi liikumise kohta tõenäosuse graafikud [94].

- **Energiakulu sõltub sõidu režiimist.**

Koormusgraafiku koostamisel tuleb arvestada, et tarbitava võimsuse suurus sõltub mingil määral ka valitud sõidurežiimist. Ühe ja sama teekonna läbimiseks võib kulutada erinevat energia hulka, mis suurel määral sõltub liikumise ajast. Sõltuvus veduri tarbitud võimsuse ja liikumiskiiruse vahel kirjeldab näitlikult allpool toodud joonis 3.26, kus on näha, et ühe ja sama teepikkuse läbimiseks võib kulutada erinevat energia hulka E_{max} ja E_{min} , vastavalt valitud ajale T_{is_mis} või T_{is_max} . Seega modelleerimise täpsete tulemuste saamiseks tuleb vaadelda rongi sõiduplaani.



Joonis 3.26 Veduri võimsuse tarbimise sõltuvus sõidu ajast [92]

4. Koormusmudelite koostamine *PSCAD*-is ning käitumine ideaalsetes tingimustes

Käesolev peatükk kajastab antud lõputöö raames *PSCAD*-is veduri koormusmudelite koostamist ning seda käitumist ideaalsetes tingimustes.

Peatükis 4.1 antakse lühidalt ülevaade *PSCAD* koormusmudeli koostamise üldinfost ning põhimõtetest. Peatükis 4.2 kirjeldatakse veduri püsitalitluse koormuskarakteristiku koostamist. Peatükis 4.3 kirjeldatakse regeneratiivse pidurdamisega veduri koormuskarakteristiku koostamist. Peatükk 4.4 kajastab *PSCAD*-i mudeli sisestamiseks vajalike parameetrite arvutust vastavalt varem koostatud koormuskarakteristikutele. Peatükis 4.5 antakse ülevaade, kuidas koostatakse veduri püsitalitluse mudel *PSCAD*-is. Peatükis 4.6 antakse ülevaade, kuidas koostatakse regeneratiivse pidurdamisega veduri mudel *PSCAD*-is. Peatükk 4.7 kajastab *PSCAD* mudelit, kus veduri parameetreid on võimalik muuta modelleerimise käigus. Peatükis 4.8 vaadeldakse vedurite mudelite talitlust ideaalsetel tingimustel. Peatükis 4.9 antakse ülevaade vooluharmonikute modelleerimise võimalustest *PSCAD*-is.

4.1. *PSCAD*-is koormusmudelite koostamise üldinfo

Käesoleva töö raames koostatud elektriveduri mudelit on planeeritud kasutada uurimiseks, kuidas mõjub elektrivedurite kasutus Eesti elektrivõrgu süsteemi talitlusele. See tähendab, et veduri mudel sisestatakse Eesti elektrivõrgu mudelisse. Seega elektriveduri mudel peab olema võimalikult lihtne, et vähendada modelleerimise aega ja arvutusvõimsust.

Seoses sellega, et ei ole teada veduri koostisosade täpseid parameetreid, kuna Rail Baltic projekti varemases staadiumis ei ole veel valitud elektrirongide tootjat, on otsustatud kasutada veduri lihtsustatud mudelit (vt. peatükk 3.3.2). Võttes arvesse kasutatava modelleerimise tarkvara *PSCAD* andmebaasi koosseisu, olemasolevaid lähteandmeid ning tulevikus eeldatavat vajadust korrigeerida mudelit, peale kasutava elektriveduri reaalsete parameetrite kätte saamist, oli otsustatud kasutada näivtakistuse mudelit. Samuti näivtakistuse mudel võimaldab veduri tüübi muutmisel kiiresti teostada ümberarvutusi.

Seega käesolevas töös kasutatakse näivtakistuse mudelit, mille jaoks kõik lähteandmed on olemas ning kasutades antud mudelit ei ole tarkvara ülekoormatud. Tuleb pöörata tähelepanu sellele, et lihtsustatud mudelite kasutamine omab ühte olulist puudust. Nimelt kaasaegsed vedurid sisaldavad jõuelektronika komponente, mis genereerivad harmoonikuid elektrivõrku.

Lihtsustatud mudelid ei modelleeri harmoonikuid. Seega harmoonikute uurimiseks tuleb rakendada täiendavaid meetodeid, et võimaldada veduri mudelis eraldi harmoonikute genereerimist.

Mudeli koostamisel on kasutatud rongi nimiaktiivvõimsust $P_n = 5 \text{ MW}$, veduri koormustegurit $\cos \varphi = 0,85$, nimifaasipinge $U_n = 25 \text{ kV}$ ning võrgusagedus $f = 50 \text{ Hz}$.

Edasiseks modelleerimiseks on vajalik koostada modelleerimiseks sobilik veduri koormusgraafik. Veduri mudeli koostamisel lähtume eelnevalt kirjeldatud kiirendus ja pidurduskarakteristikutest (vt. peatükk 3.2) ning modelleerimise põhimõtetest (vt. peatükk 3.4). Koormusgraafiku koostamisel võetakse aluseks ülalpool toodud joonised 3.19 ja 3.25.

Kuna elektriveduril võivad olla kaks erinevat pidurdussüsteemi, siis veduri talitlust on planeeritud modelleerida nii regeneratiivse pidurdamisega kui ka ilma regeneratiivse pidurdamiseta, ning võrrelda saadud tulemusi.

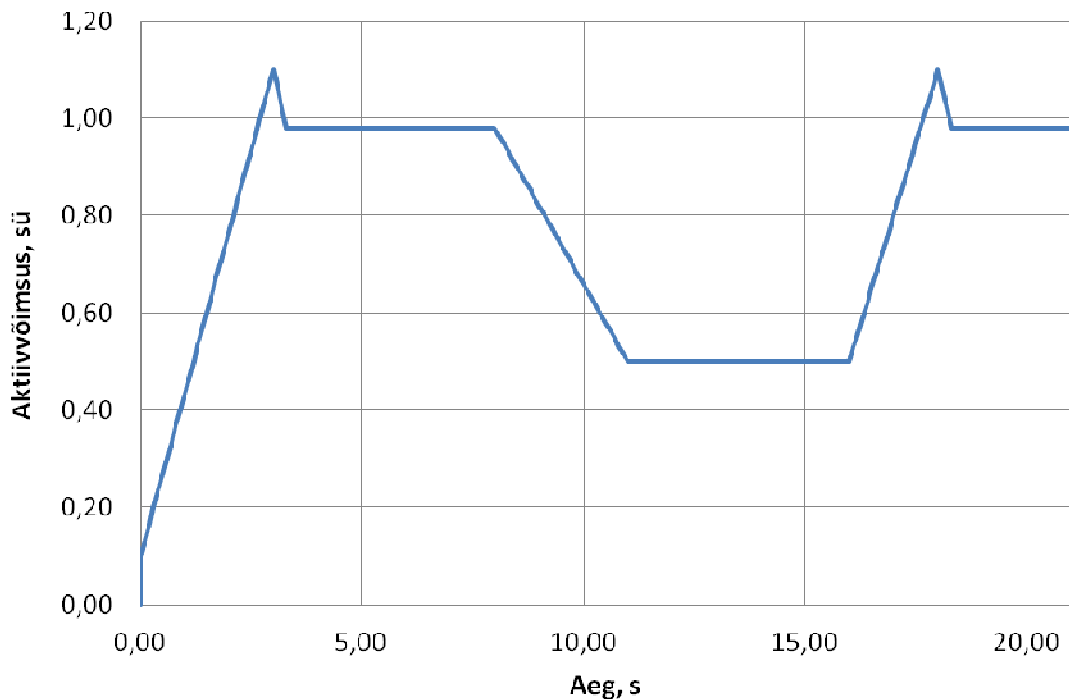
Selleks vaadeldakse eraldi kahe erineva veduri koormusgraafikut. Esimene on veduri liikumine, mis ei sisalda regeneratiivset pidurdamist. Koormusgraafik koostatakse selliselt, et ühes tee osas langeb tarbimine poole võrra, ning peale mõne aja tarbimist poolel nimivõimsusel, suureneb tarbimine kuni nimiväärtuseni. See kirjeldab olukorda, kus näiteks lubatud kiirus on piiratud tee kõveruse tõttu, ning vedur peab ajutiselt vähendama kiirust. Teine koormusgraafik sisaldab regeneratiivset pidurdamist.

Koormusgraafiku kestus ei pea olema sama kui tegelik. Modelleerimise koormusgraafiku põhi vajadus on näidata elektrivõrgu jaoks kõige olulisemaid režiime. Need on kiirendamine, liikumine püsikiirusega ja pidurdamine. Iga režiimi kestus peab olema piisav, et tarkvara poolt arvutamise siirdeprotsessid lõpeksid ning oleks nähtavad tegelikud protsessid, mis tekivad elektrisüsteemis. Iga režiimi kestuseks on võetud 3-4 sekundit.

Modelleerimiseks koostatakse koormusgraafik suhtelistes ühikutes. See võimaldab antud koormusgraafikut rakendada erinevate võimsustega vedurite jaoks.

4.2. Veduri püsitalitluse koormuskarakteristiku koostamine

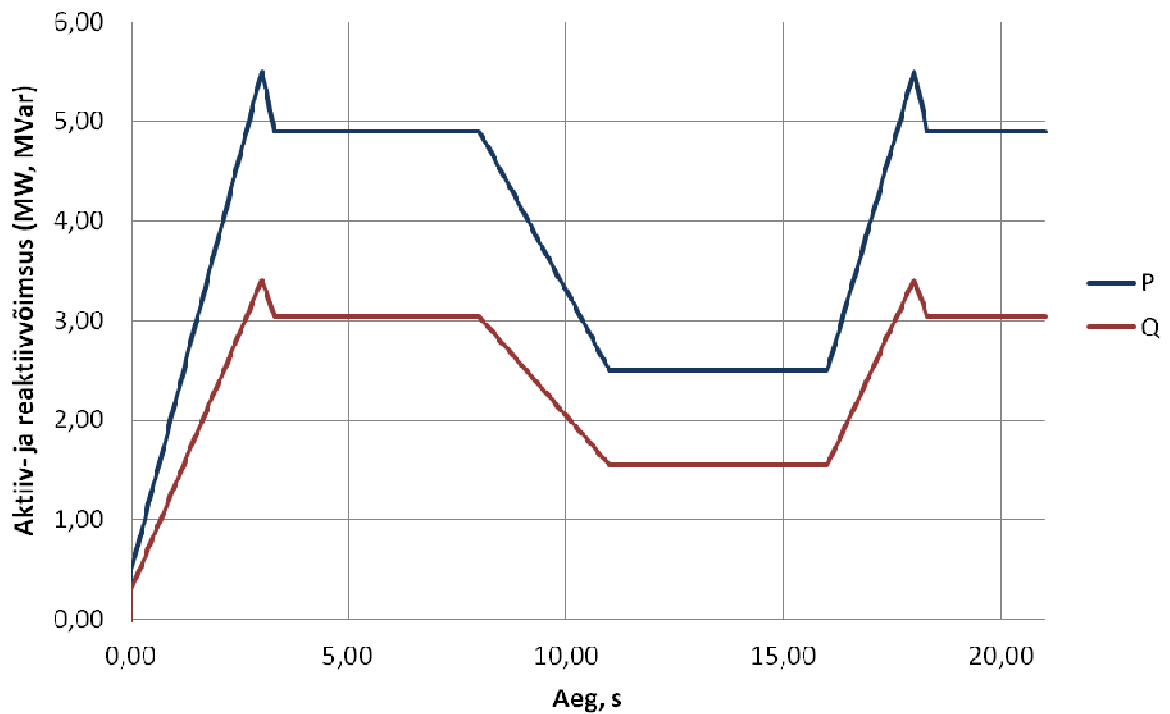
On koostatud ilma regeneratiivse pidurdamiseta karakteristik, mida kasutatakse uurimiseks kuidas rongi koormuse muutus mõjutab pinget ning elektrivõrgu koormuse muutust. Selleks on koostatud graafik, mis on esitatud joonisel 4.1.



Joonis 4.1 Veduri koormusgraafik püsitalitlusel, suhtühikutes

Veduri koormusgraafikul ajast 0 kuni 3 sekundini toimub kiirendus maskimaalkiiruseni, mis tõstab tarbitavat aktiivvõimust kuni 1,1 korda veduri nimivõimsusest. Selle järel toimub liiklus ühtlase kiirusega viie sekundi jooksul (ajast 3 kuni 8 sekundit), mille käigus tarbitav aktiivvõimus esiteks langeb järsult 0,98 nimivõimsusest ning seejärel säilitatakse püsivalt väärtusel 0,98 nimivõimsusest. Sellele järgneb 3 sekundiline pidurdamine (ajast 8 kuni 11 sekundit) ning seejärel 5 sekundiline liikumine ühtlase kiirusega (ajast 11 kuni 16) poolel nimivõimsusel. See järel toimub kiirendamine 2 sekundi jooksul (ajast 16 kuni 18 sekundit), mis tõstab tarbitavat aktiivvõimust kuni 1,1 korda veduri nimivõimsusest. Selle järel toimub liikumine ühtlase kiirusega kolme sekundi jooksul (ajast 18 kuni 21 sekundit), mille käigus tarbitav aktiivvõimus esiteks langeb järsult nimivõimsuseni ning seejärel säilitatakse püsivalt väärtusel 0,98 nimivõimsusest. Saadud veduri modelleerimise tsükkel on 21 sekundit.

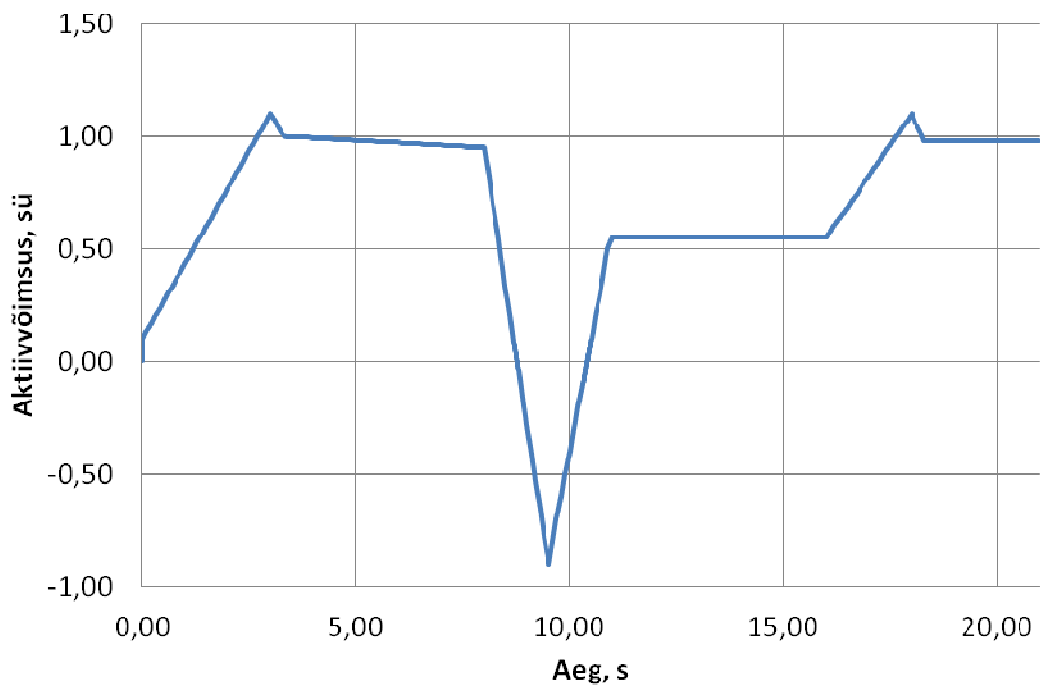
Võttes arvesse modelleerimisel kasutatava veduri nimivõimsust (5 MW) ning võimsustegurit (0,85) on näitlikkuse jaoks koostatud ka veduri koormusgraafik naturaalühikutes, mis on esitatud allpool joonisel 4.2.



Joonis 4.2 Veduri koormusgraafik püsitalitusel

4.3. Regeneratiivse pidurdamisega koormuskarakteristiku koostamine

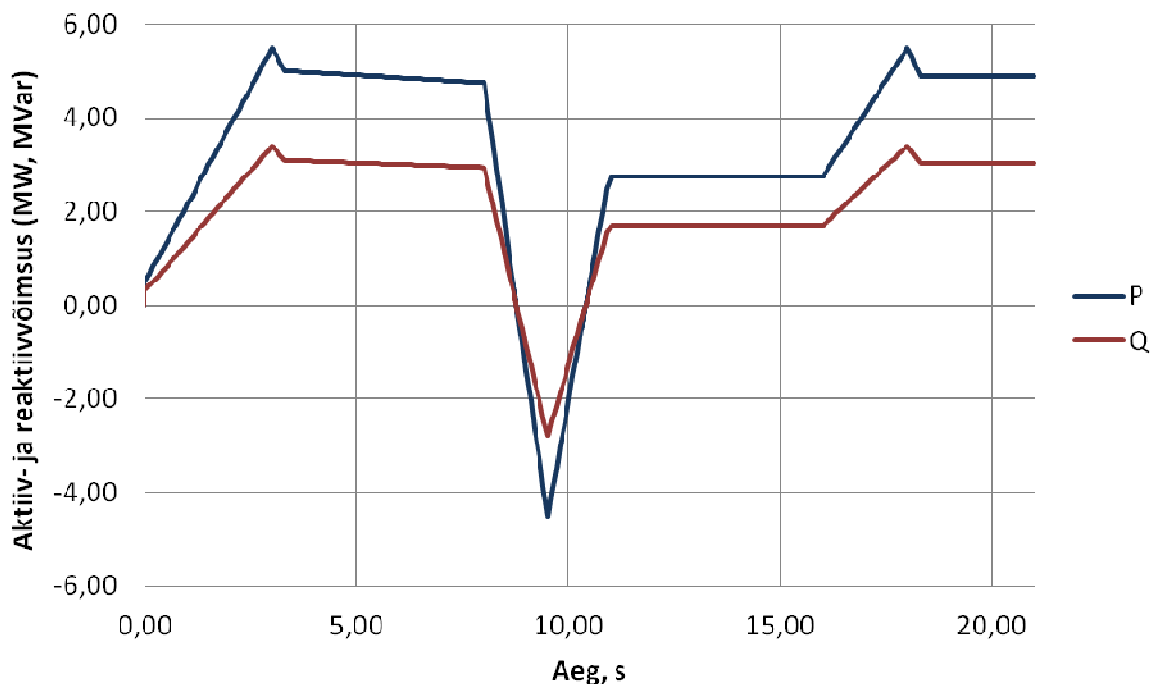
Kasutades eelnevalt kirjeldatud veduri võimsuse tarbimise graafikut (vt. joonis 3.19) oli koostatud regeneratiivse pidurdamisega koormuskarakteristik suhtühikutes, mis on esitatud allpool joonisel 4.3.



Joonis 4.3 Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamisega, suhtühikutes

Veduri koormusgraafikul ajast 0 kuni 3 sekundini toimub kiirendus maskimaalkiiruseni, mis tõstab tarbitavat aktiivvõimust kuni 1,1 korda veduri nimivõimsusest. Selle järel toimub liiklus ühtlase kiirusega viie sekundi jooksul (ajast 3 kuni 8 sekundit), mille käigus tarbitav aktiivvõimus esiteks langeb järsult nimivõimsuseni ning seejärel langeb sujuvalt 0,95 nimivõimsusest. Sellele järgneb 2,5 sekundiline pidurdamine (ajast 8 kuni 10,5 sekundit) kasutades regeneratiivset pidurdamist ning 0,5 sekundiline kiirendamine (ajast 10,5 kuni 11), mis tõstab tarbitavat aktiivvõimsust kuni 0,55 korda veduri nimivõimsusest. Sellele järgneb 5 sekundiline liikumine püsikiirusega (ajast 11 kuni 16 sekundit), kus tarbitakse 0,55 korda veduri nimivõimsusest. See järel toimub kiirendamine 2 sekundi jooksul (ajast 16 kuni 18 sekundit), mis tõstab tarbitavat aktiivvõimust kuni 1,1 korda veduri nimivõimsusest. Selle järel toimub liiklus pideva kiirusega kolme sekundi jooksul (ajast 18 kuni 21 sekundit), mille käigus tarbitav aktiivvõimus esiteks langeb järsult nimivõimsuseni ning seejärel säilitatakse püsivalt väärtusel 0,98 nimivõimsusest. Saadud veduri modelleerimise tsükkel on 21 sekundit.

Võttes arvesse modelleerimisel kasutatava veduri nimivõimsust (5 MW) ning võimsustegurit (0,85) on näitlikkuse jaoks koostatud ka regeneratiivse pidurdamisega veduri koormusgraafik naturaälühikutes, mis on esitatud allpool joonisel 4.4.



Joonis 4.4 Veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamisega

4.4. PSCAD-i mudeli parameetrite arvutus

PSCAD mudelis kasutatavad takistite väärtused on arvutatud vastavalt allpool valemitele.

Koormuse ühe faasi aktiivtakistust (R_f) saab avaldada:

$$\left. \begin{aligned} P_f &= U_f \cdot I \cdot \cos \varphi \\ P_f &= I^2 \cdot R_f \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_f = \frac{U_f \cdot I \cdot \cos \varphi}{I^2} = \frac{U_f \cdot \cos \varphi}{I} = \frac{U_f \cdot \cos \varphi}{I} \cdot \frac{U_f \cdot \cos \varphi}{U_f \cdot \cos \varphi} =$$

$$= \frac{U_f^2 \cdot \cos^2 \varphi}{I \cdot U_f \cdot \cos \varphi} = \frac{U_f^2 \cdot \cos^2 \varphi}{P_f} \quad (4.1)$$

kus U_f – faasipinge, V

I – vool, A

$\cos \varphi$ – võimsustegur, sü

$$\text{Koormuse } \tan \varphi \text{ avaldame } \cos \varphi \text{ kaudu: } \tan \varphi = \tan(\arccos(\cos \varphi)) \quad (4.2)$$

$$\text{Koormuse ühe faasi reaktiivtakistus } (X_f): \tan \varphi = \frac{X}{R} \Rightarrow X_f = R_f \cdot \tan \varphi \quad (4.3)$$

Koormuse ühe faasi induktiivsust (L_f) avaldatakse induktiivtakistuse kaudu valemiga:

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_f \Rightarrow L_f = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.4)$$

kus X_L – induktiivtakistus, Ω

ω – nurksagedus, s^{-1}

f – võrgusagedus, Hz

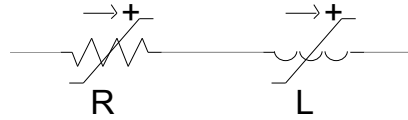
4.5. Veduri püsitalitluse mudeli koostamine PSCAD-is

Käesoleva lõputöö raames on vedur modelleeritud näivtakistuse mudelina. Juhtivatest R ja L elementidest koosnev koormusmudel, mis vastavalt parameetrite muutmisele käituks võimalikult realistlikult. Eeldame, et selliselt koostatud mudelid oleksid kergemini käsitletavad ning universaalsemad kui otse konkreetse inverteri ja mootoriga mudelid.

Püsitalitluse veduri mudel modelleerib veduri tarbimist kõikides režiimides nii kiirendamisel, kui ka pidurdamisel. Veduri tarbimist toidab ideaalne toiteallikas, mis on valitud nii, et veenduda et ideaalsetes tingimustes veduri mudel käitub nii, nagu oli ette nähtud. Ideaaltoiteallika nimipinge on valitud võrdne planeeritava kontaktvõrgu nimipingega 25 kV.

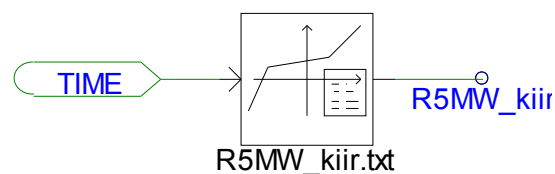
Püsitalitluse veduri mudel koosneb kahest takistitest: aktiiv- ja reaktiivtakistid (vt. joonis 4.5).

Reaktiivtakistus on esitatud induktiivsuse kaudu.



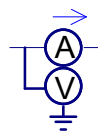
Joonis 4.5 Muudetavad takistid veduri mudelis

Muudetavate takistite väärtuste juhtimiseks kasutatakse *X-Y transfer function* blokki. Antud blokk on põhimõtteliselt X-Y koordinaatide tabel, kus *X* koordinaat on aeg alates simulatsiooni algusest, ning *Y* on soovitud väljundparameeter (antud juhul takistus). Blokki on sisseehitatud tabelivorm maksimaalselt 10 koordinaatide paaride jaoks. Suurema hulga sisestamiseks kasutatakse välist andmefaili. Koordinaatide paaride arv sõltub väljundparameetri graafiku käänupunktide arvust ning soovitud tulemuste täpsusest. Suurema täpsuse saamiseks tuleb koordinaatide paaride arvu suurendada ning lisada täiendavad punktid käänupunktides ning nullteljega ristumisel. Vaadeldavates veduri koormusgraafikutes on rohkem kui 10 koordinaatide paari. Seega kasutatakse välist andmefaili. Andmefailid koostatakse veduri mudeli aktiivtakistuse (*R*) ning induktiivsuse (*L*) jaoks eraldi. Andmefaili näidis on toodud lisas L.1. Andmefaili koostamisel on võetud arvesse *PSCAD* tarkvara sisestuskeelt ning sisestatavate väärtuste piiranguid. Piirangud on seotud näiteks aktiivtakistuse maksimaalselt lubatava väärtusega, mida tarkvara võtab arvesse kui lõpmatus jne. Saadud väljundsignaalid saadetakse muudetavatele takistitele. Allpool joonisel 4.6 on toodud veduri muudetava aktiivtakistuse signaali *R5MW_kiir* saamise loogikaskeem.



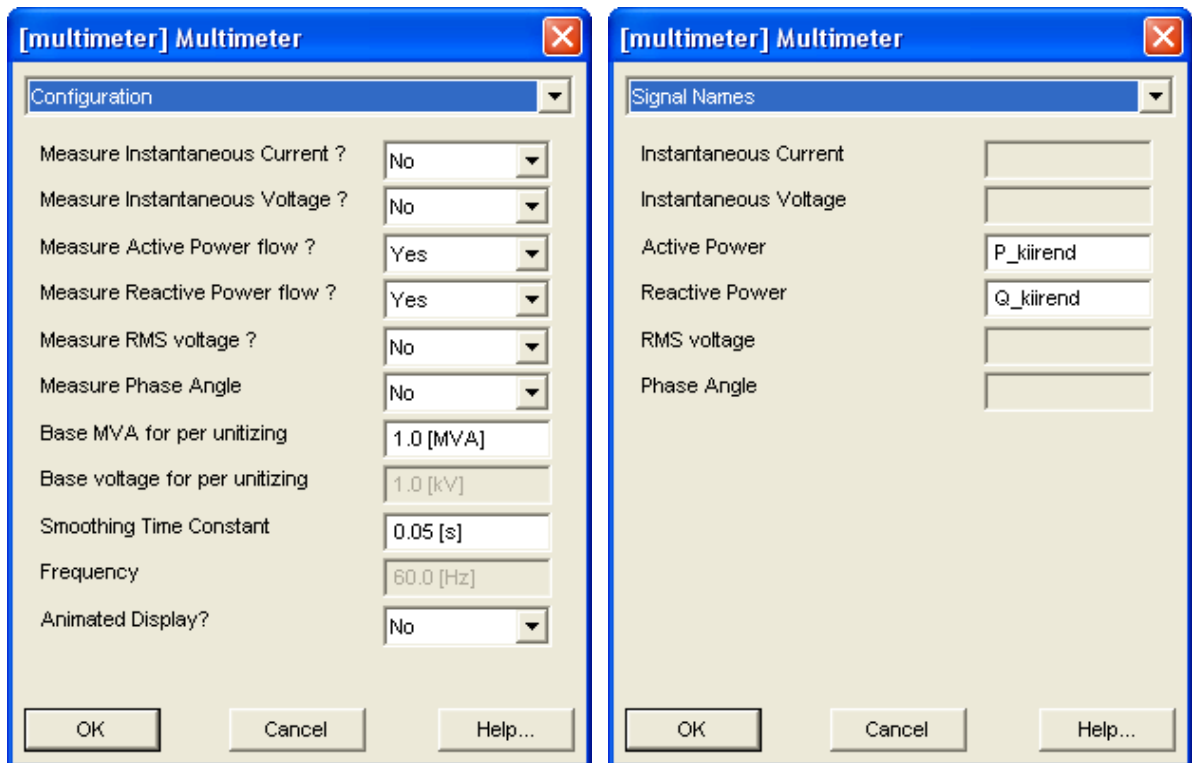
Joonis 4.6 Veduri aktiivtakistuse saamise loogikaskeem

Mudelisse on lisatud multimeetrid tulemuste analüüsimiseks. Multimeetrite tingmärk on toodud allpool joonisel 4.7.



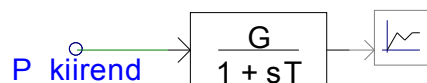
Joonis 4.7 PSCAD mudeli multimeetri tingmärk

PSCAD-is saab häälestada multimeetri, valides mõõdetavaid suurusi ning vajadusel suhtühikute saamiseks ka baasühikut. Mõõdetavate suuruste edasiseks kasutamiseks tuleb sisestada mõõdetavatele suurustele vastavad nimetused (vt. joonis 4.8).

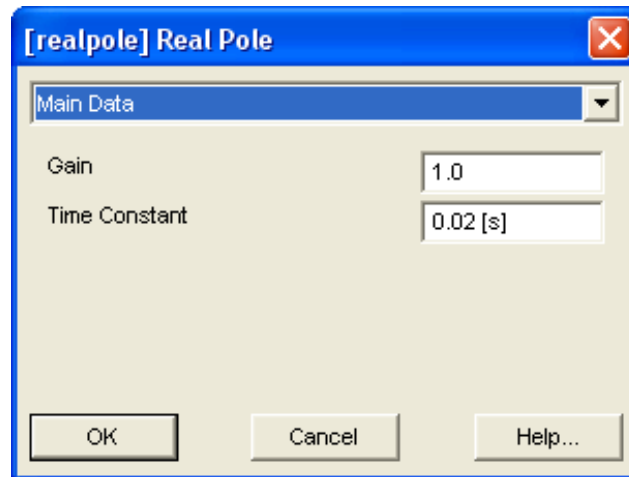


Joonis 4.8 PSCAD mudeli multimeetri dialoogiaken

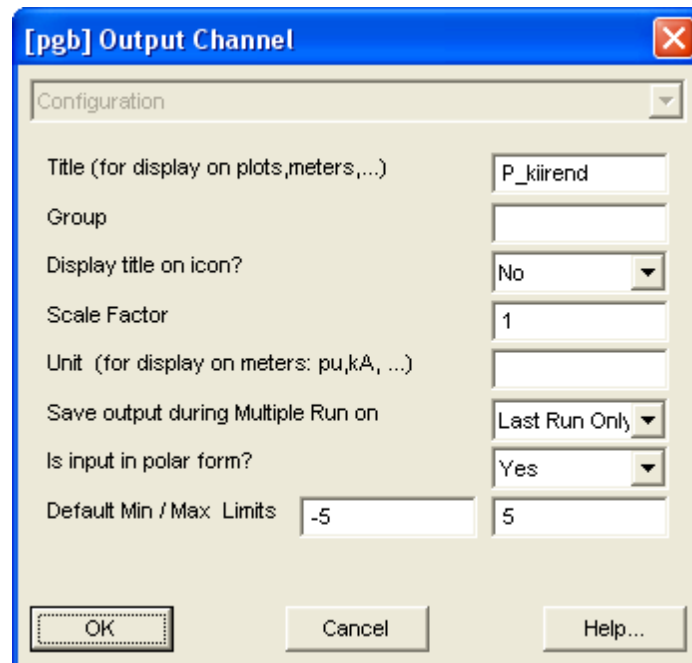
Mõõdetavate suuruste nimetusi kasutatakse *PSCAD*-is tulemuste visualiseerimiseks graafikul. Selleks ühendatakse mõõdetava suurusega signaal visualiseerimise blokiga. *PSCAD* tarkvara omab väga täpsete arvutuste tulemuste saamiseks väga lühikest arvutussammu (nt. 50 μ s), aga visualiseerimisel ressursside kokku hoidmiseks kasutatakse palju suuremat sammu, selleks kasutatakse $G/(1+sT)$ blokki, mis ühtlustab mõõtmisel saadud tulemused graafikuks. Mõõdetud suuruse visualiseerimise skeem on esitatud allpool joonisel 4.9. $G/(1+sT)$ bloki dialoogiaken on esitatud allpool joonisel 4.10, kus võimendustegur võrdub ühega, ning ajakonstant võrdub 0,02 s. Visualiseerimise bloki seadistusel sisestatakse võimendusteguri, minimaalsed ja maksimaalsed väärtused (vt. joonis 4.11)



Joonis 4.9 Mõõdetava suuruse visualiseerimine

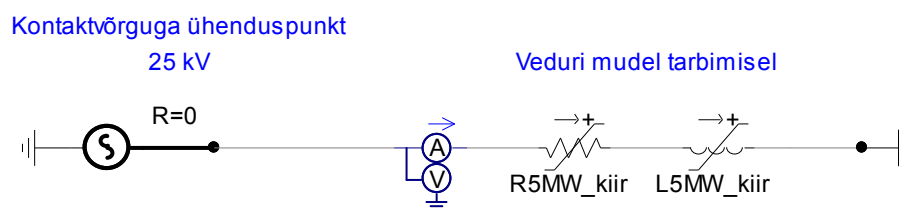


Joonis 4.10 $G/(1+sT)$ bloki dialoogiaken



Joonis 4.11 Visualiseerimise bloki dialoogiaken

PSCAD-i veduri mudeli skeem püsitalitluses on esitatud allpool joonisel 4.12. Skeem koosneb ideaaltoiteallikast, multimeetrist, veduri aktiivtakistusest ning induktiivsusest.



Joonis 4.12 Püsitalitluse veduri mudeli skeem PSCAD-is

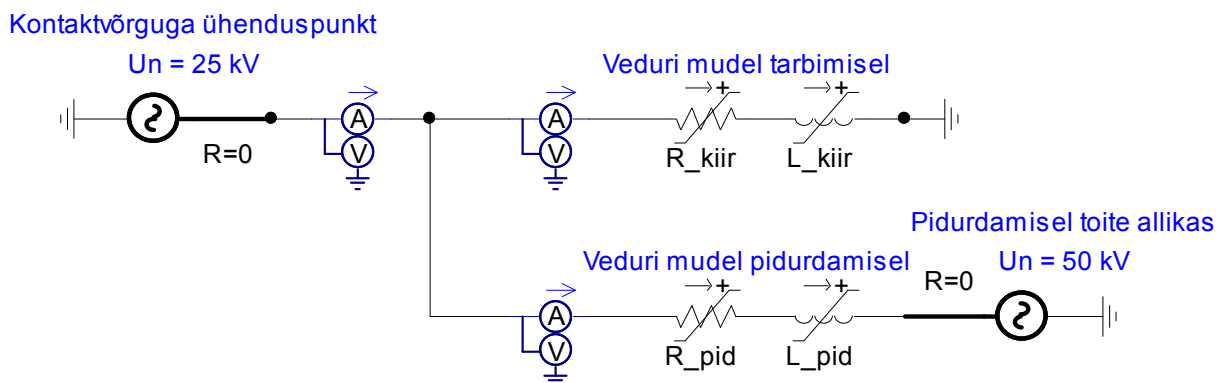
4.6. Regeneratiivse pidurduskarakteristikuga PSCAD mudeli koostamine

PSCAD mudel regeneratiivse pidurdamisega koostatakse analoogselt eelmises punktis kirjeldatud mudeliga. Erinevus seisneb selles, et eelmisse mudelisse tuleb lisada veduri mudel regeneratiivsel pidurdamisel.

PSCAD-is on modelleeritud veduri mudel takistite näol ning mudel on jaotatud kaheks osaks. See on tingitud sellest, et koormustalitlus ning regeneratiivne talitlus on kaks erinevat režiimi, mida on vajalik eraldi modelleerida. Mudeli esimene osa moodustab koormusmudel, kus elektrienergiat tarbitakse kontaktvõrgust. Antud osa modelleerib veduri tarbimist kõikides režiimides nii kiirendamisel, kui ka pidurdamisel, juhul, kui tarbitav aktiivvõimsus on suurem kui genereeritav ($P_{tar} > P_{gen}$). Veduri tarbimist toidab ideaalne toiteallikas, mis on valitud, et välistada allika mudelist ning selle seadistusest tingitud mõjud. Ideaalallika nimipinge on valitud võrdne planeeritava kontaktvõrgu nimipingega 25 kV.

Mudeli teine osa kirjeldab veduri koormuse käitumist regeneratiivsel pidurdamisel, juhul kui veduri poolt genereeritav aktiivvõimsus on suurem kui tarbitav ($P_{gen} > P_{tar}$). Genereeritava võimsuse edastamiseks kontaktvõrku on vajalik tekitada vastassuunaga voolu. Selleks on modelleeritud teine ideaalallikas regeneratiivse mudeli teises otsas (vt. joonis 4.13), mille nimipinge on kaks korda suurem, kui esimese ideaalallika nimipinge ehk 50 kV. Seega tekib potentsiaalide erinevus regeneratiivse mudeli otsades, mis on võrdne kontaktvõrgu nimipingega 25 kV.

Mõlemad veduri mudeli osad koosnevad kahest takistist: aktiiv- ja reaktiivtakisti (vt. eelesitatud joonis 4.5). Uute muudetavate takistite väärtuste juhtimiseks koostatakse uued muutuvate takistuste andmefailid, analoogselt ülalpool punktis 4.5 kirjeldatuga. PSCADi veduri mudeli skeem regeneratiivse pidurdamisega on esitatud allpool joonisel 4.13.

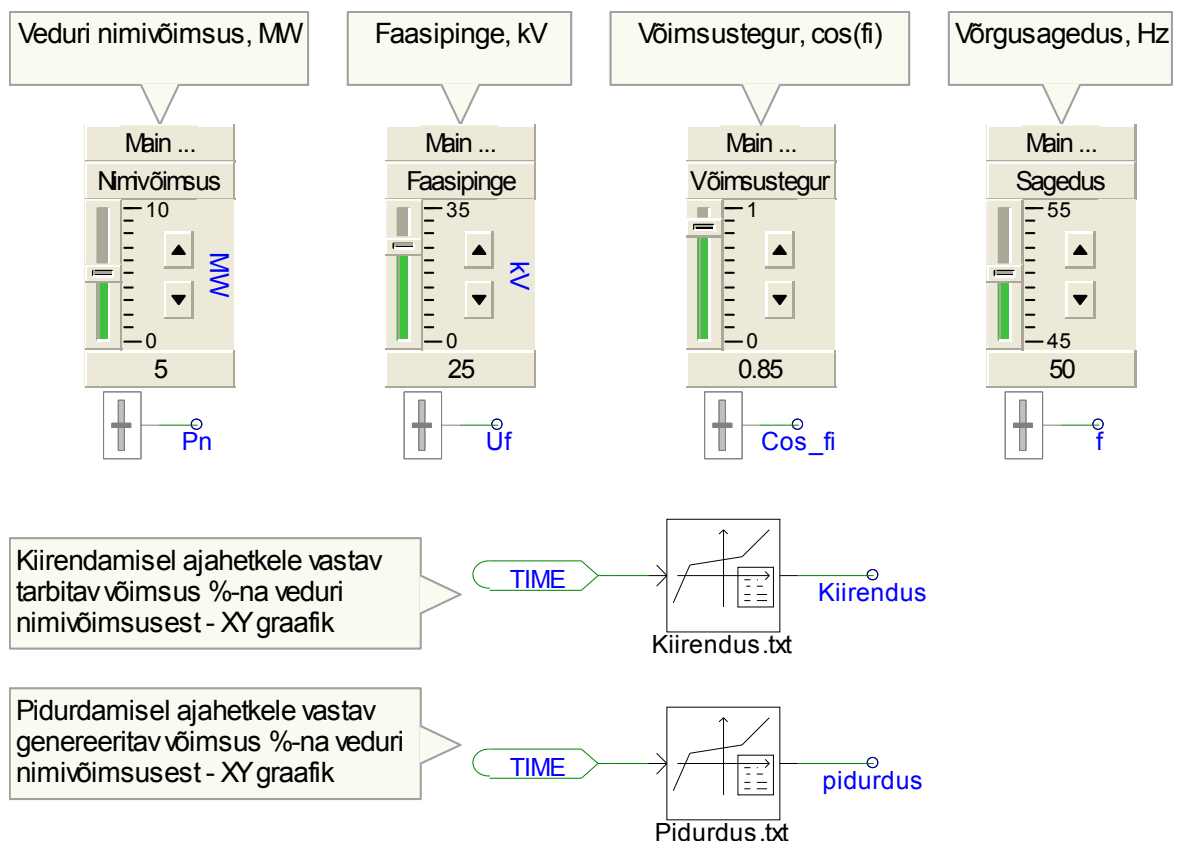


Joonis 4.13 PSCADi veduri mudeli skeem regeneratiivse pidurdamisega

4.7. Modelleerimise käigus juhitava mudeli kirjeldus

Lisaks eelnevalt kirjeldatud mudelile on koostatud *PSCAD*-is modelleerimise käigus juhitud mudel. Juhitavate mudelite lähteandmeid, väljaarvatud koormusgraafik suhtühikutes, on võimalik muuta *PSCAD*-is modelleerimise käigus, kus vastavalt muudetud lähteandmetele automaatselt arvutatakse välja vajalikud suurused ning sisestatakse mudelisse. Antud mudel võtab palju ressursse arvutamisel, kuna peale võrgu modelleerimist kulutakse arvutusressursse ka suuruste arvutamiseks lähteandmetest. Samuti lähteandmete muutmine toimub käsitsi, seega antud mudelit ei ole edaspidi kasutatud antud lõputöös veduri mõju modelleerimiseks elektrisüsteemi talitlusele. Antud mudelit võib kasutada veduri talitluse uurimiseks.

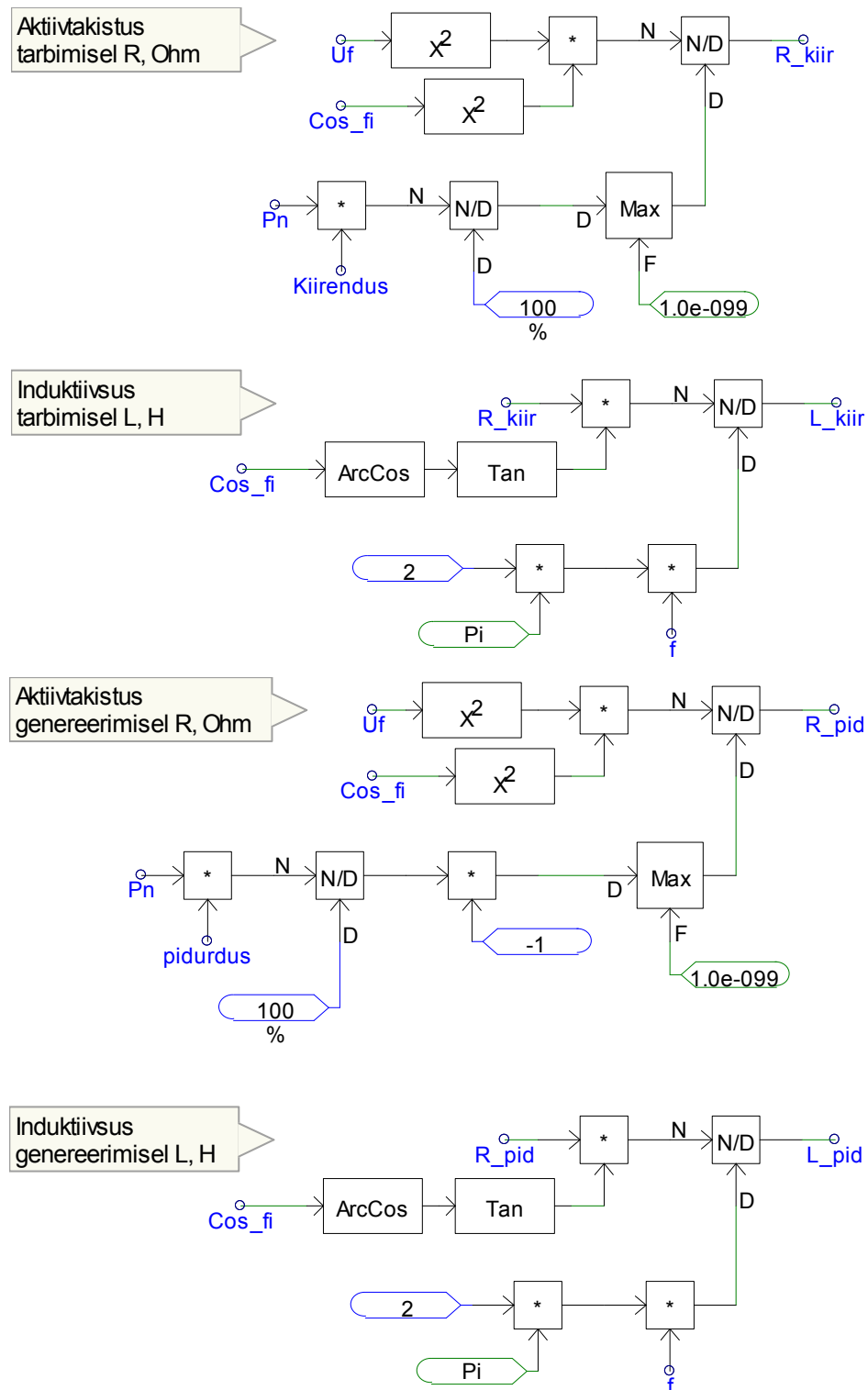
Lähteandmed, mida on võimalik muuta on: veduri nimipinge, kontakivõrgu nimipinge, võimsustegur ja võrgusagedus. Allpool joonisel 4.14 on näidatud juhitava mudeli lähteandmete sisestamine *PSCAD*-is.



Joonis 4.14 Juhitava mudeli lähteandmete sisestamine *PSCAD*-is

Veduri mudeli skeem (vt. joonis 4.13) ei muutu, muudetakse ainult muudetavate takistuste andmefaili, kus naturaallühikutes väärtuste asemel on salvestatud andmed protsentides.

Kasutades valemeid eelmisest peatükist 4.4, arvutatakse PSCAD-is vajalikke suursusi: tarbimisel ja genereerimisel aktiivtakistus R ning induktiivsus L . Nende arvutuste loogika skeem on esitatud allpool joonisel 4.15.



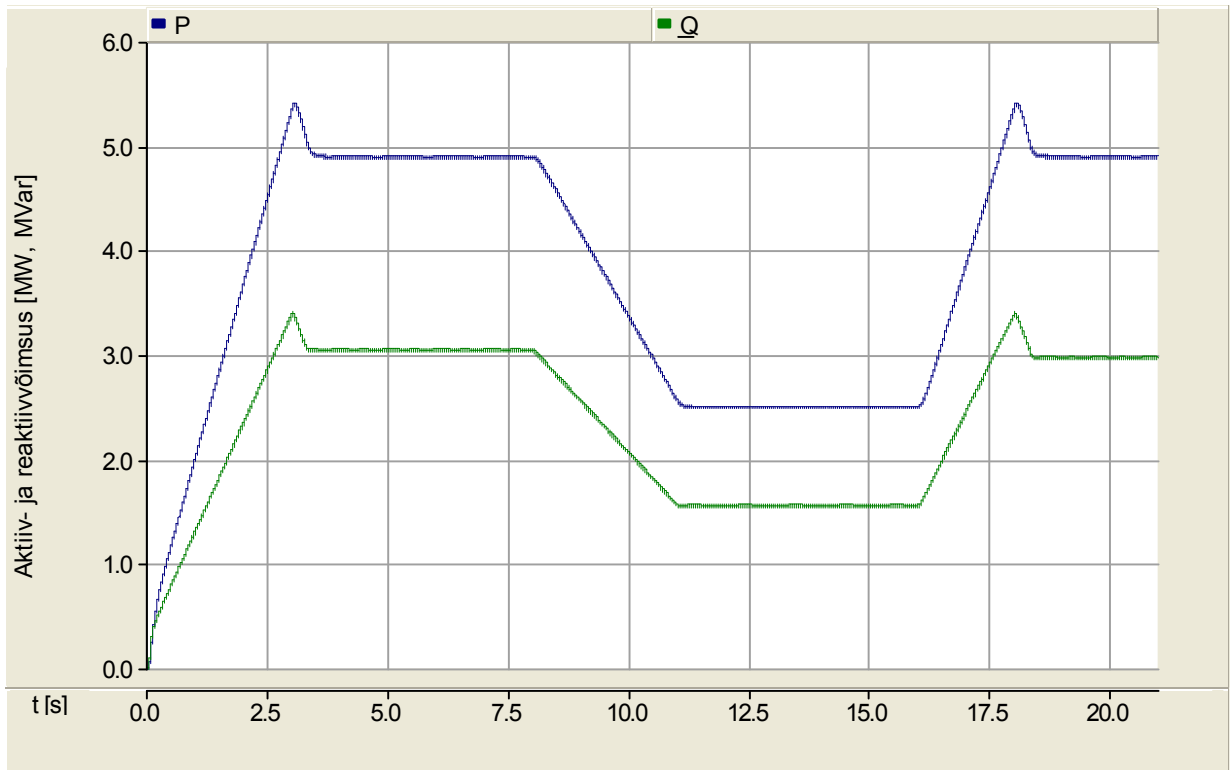
Joonis 4.15 Juhitava mudeli takistuste arvutus PSCAD-is

Saadud modelleerimise tulemused on analoogsed peatükis 4.6 vaadeldud mudeliga, seega eraldi neid ei esita.

4.8. Koostatud vedurite mudelite talitus ideaaltingimustel

Antud punktis esitatakse ülalpool peatükkides 4.5 ja 4.6 vaadeldud vedurite mudelite talitluse tulemusi ideaalsetel tingimustel: koormus- ja pingegraafikud.

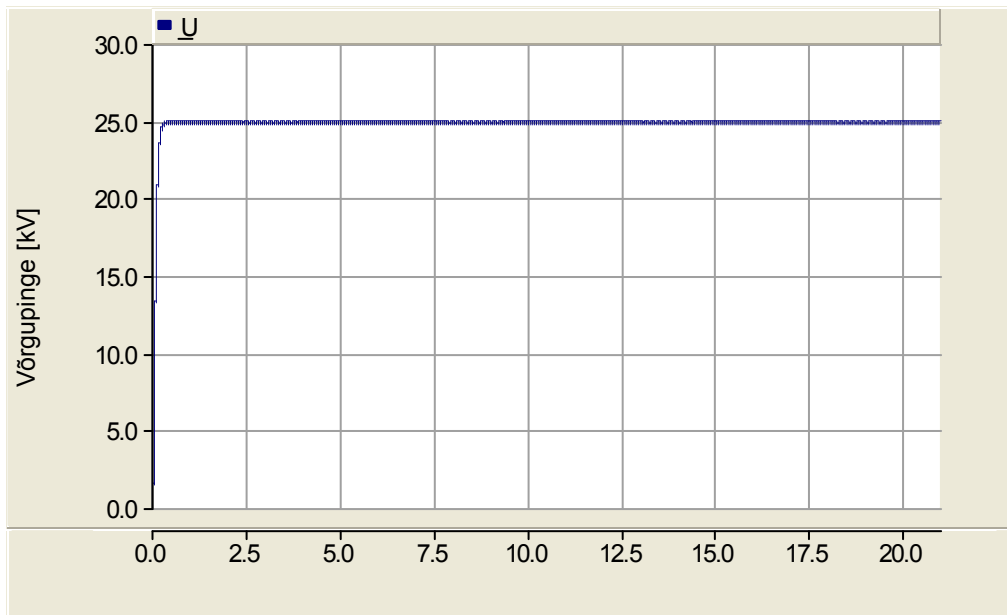
Allpool joonisel 4.16 on näidatud veduri püsitalitluse modelleerimisel saadud koormusgraafik, mis on sarnane graafikuga, mis oli võetud modelleerimise aluseks ning näidatud ülalpool joonisel 4.2.



Joonis 4.16 Modelleerimisel saadud veduri püsitalitlusel koormusgraafik

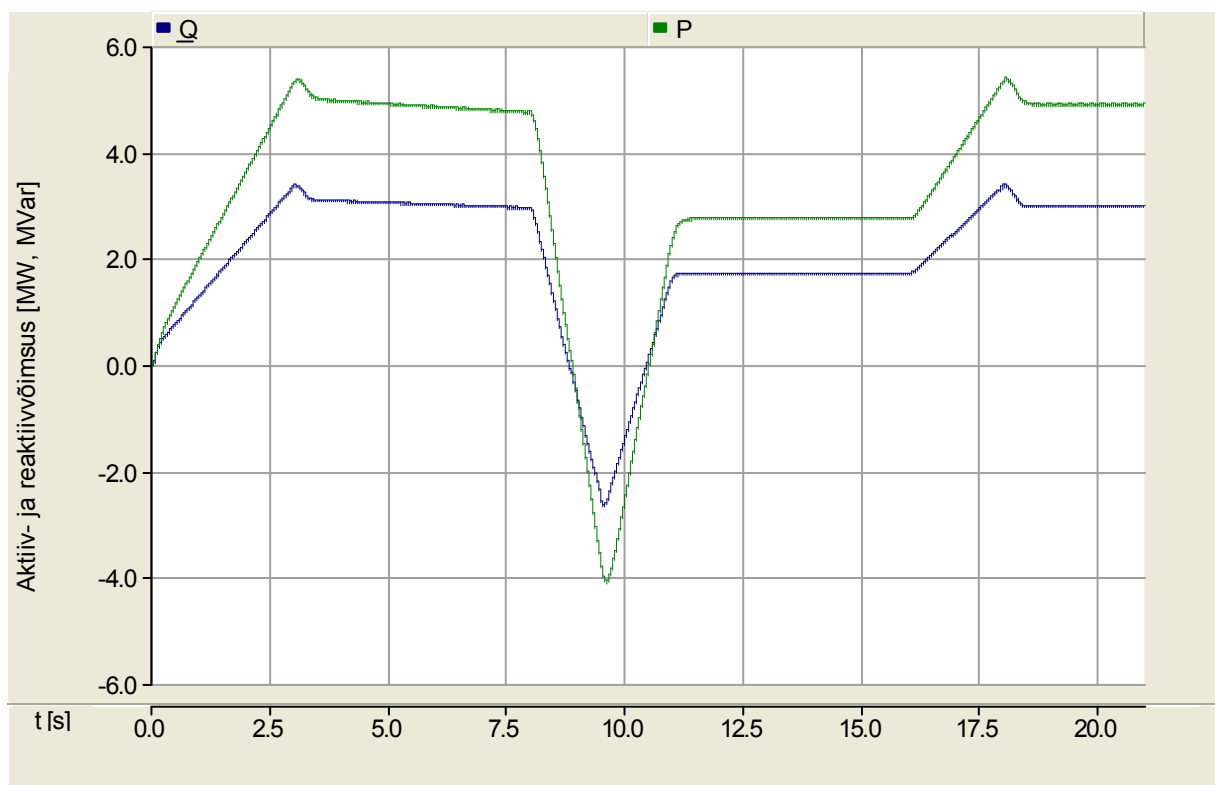
Allpool joonisel 4.17 on esitatud veduri mudeli püsitalitlusel saadud pingegraafik, mille järgi peale mudeli rakendumist pinge on konstantne ning võrdub kontaktvõrgu nimipingega. Antud tulemus vastab ideaalsetele tingimustele, kus on ideaalne toiteallikas ning puuduvad teised mõjurid.

Modelleerimisel saadud koormus- ja pingegraafikud on sarnased alusgraafikutega, mida oli kasutatud modelleerimiseks. Sellest saab järeldada, et veduri mudel püsitalitlusel on koostatud õigesti ning käitub ideaalsetes tingimustes vastavalt ettenähtud viisile.



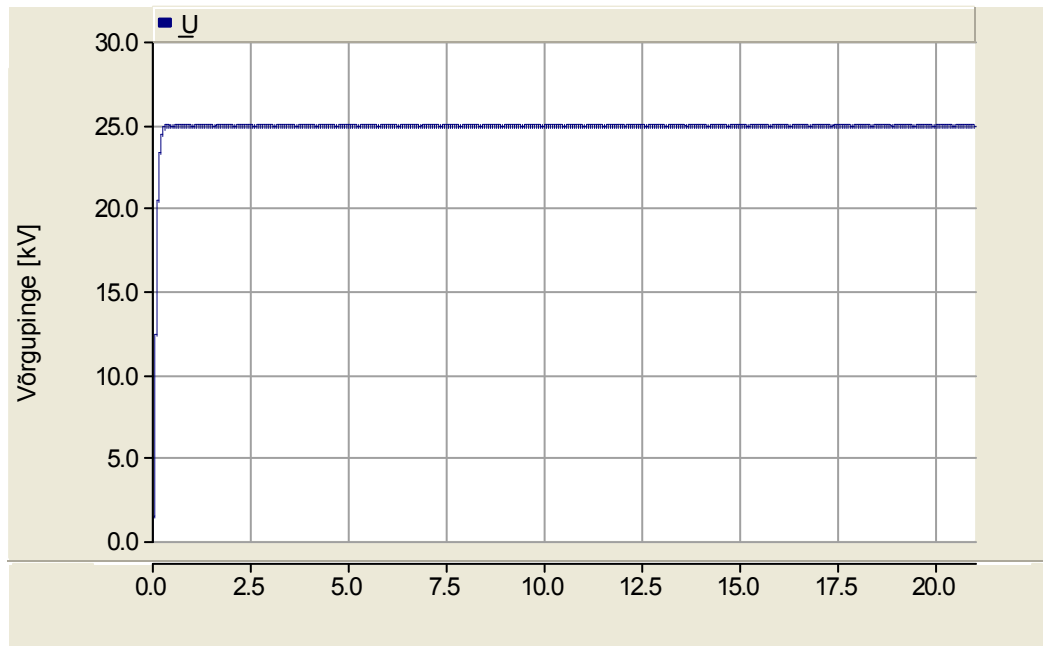
Joonis 4.17 Modelleerimisel saadud veduri püsitalitusel võrgupinge graafik

Allpool joonisel 4.18 on näidatud veduri mudeli regeneratiivse pidurdamisega modelleerimisel saadud koormusgraafik, mis on sarnane graafikuga, mis oli võetud modelleerimise aluseks ning näidatud joonisel 4.4.



Joonis 4.18 Modelleerimisel saadud veduri koormusgraafik regeneratiivse pidurdamisega

Allpool joonisel 4.19 on esitatud pingegraafik, mille järgi peale mudeli rakendumist pinge on konstantne ning võrdub kontaktvõrgu nimipingega. Antud tulemus vastab ideaalsetele tingimustele, kus on ideaalne toiteallikas ning puuduvad teised mõjurid.



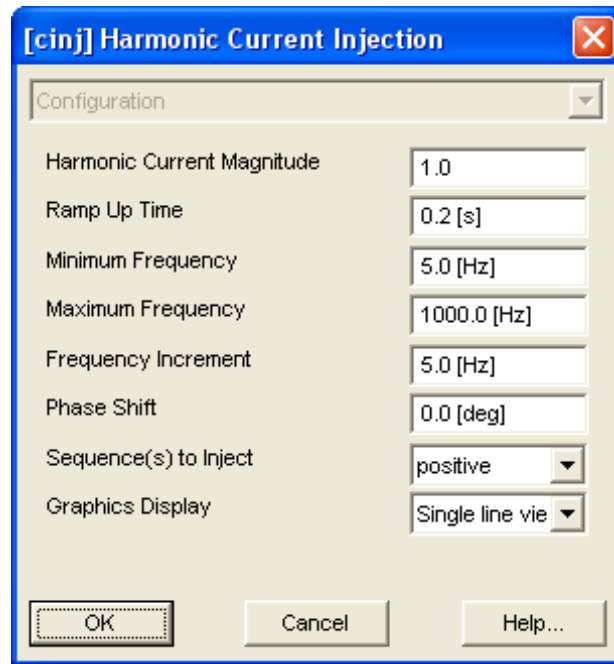
Joonis 4.19 Modelleerimisel saadud graafik veduri regeneratiivse pidurdamisega võrgupinge graafik

4.9. PSCAD-i mudelis kõrgemate harmoonikute modelleerimine

Kaasaegsetes vedurites kasutatakse kiiruse reguleerimiseks takistite asemel jõuelektroonikal põhinevaid ajameid, mis genereerivad kõrgemaid harmoonikuid kontaktvõrku. PSCAD mudelis on võimalik kõrgemaid vooluharmoonikuid modelleerida kasutades kahte erinevat meetodit.

Esimeses meetodis kasutatakse blokki nimetusega "*Multiple Harmonic Current Source*". Nagu blokki nimetus viitab võimaldab antud blokk indutseerida vastavalt seadistusele harmoonikutele vastavat voolu. Tuleb pöörata tähelepanu, et kasutades seda blokki genereeritakse elektrivõrku kõikidel ettemääratud sagedustel võrdsete amplituudidega vooluharmoonikuid. Samuti tuleb arvestada, et antud blokiga ei ole võimalik sisestada üksikut harmoonikut. Ka antud blokiga ei ole võimalik genereerida mitut suvalist harmoonikut, ning valikut on võimalik teostada vaid harmoonikute genereerimisel kehtivaid seaduspärasusi arvestas. Seega on võimalik määraminimaalse, maksimaalse harmoonikute sagedus vahemik ning sageduste samm.

Allpool joonisel 4.20 on esitatud voolu harmoonikute modelleerimise bloki konfiguratsiooni tabel.

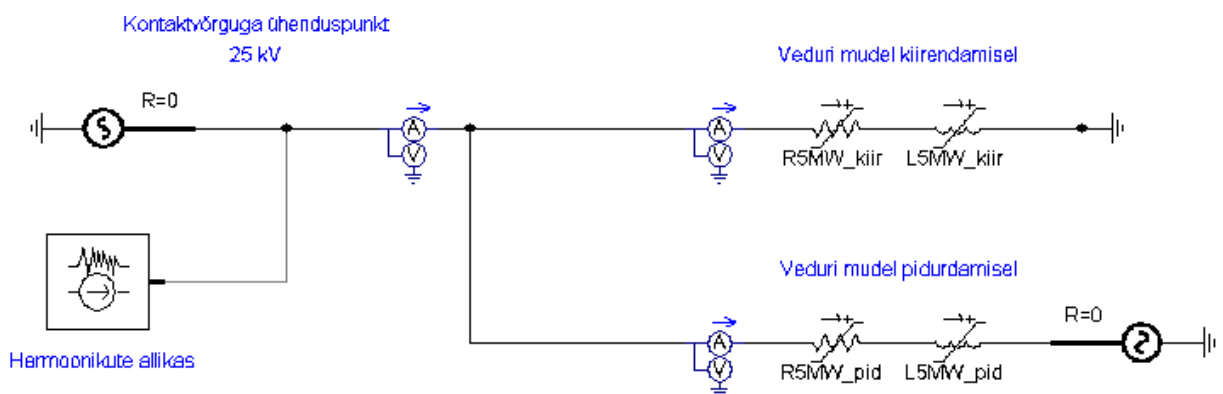


Joonis 4.20 Harmoonikute modelleerimise bloki dialoogiaken

Voolu harmoonikute modelleerimise seadistamisel tuleb sisestada järgmised lähteandmed:

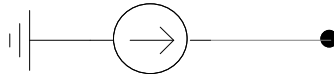
1. Voolu harmoonikute amplituud [kA]
2. Rambi kestus [s]
3. Harmoonikute minimaalsed ja maksimaalsed sagedused [Hz]
4. Harmoonikute sageduste juurdekasv [Hz]
5. Faasinihe [°]
6. Järgnevus (positiivne, negatiivne, null-, kõik)

Voolu harmoonikute modelleerimise blokk lisatakse rööpselt rongi mudeliga (vt. joonis 4.21).

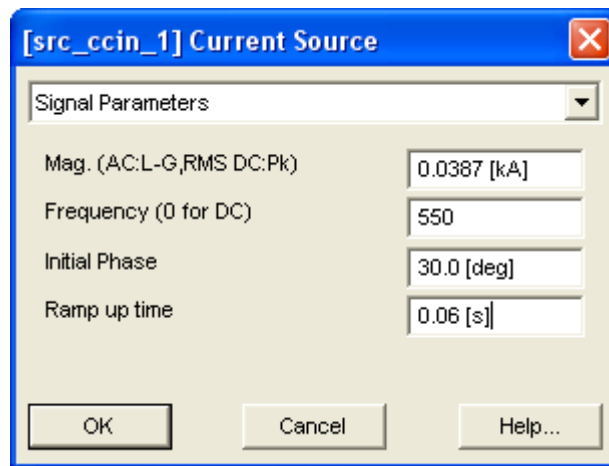


Joonis 4.21 Veduri mudeli skeem koos harmoonikute allikaga

Üksikute vooluharmonikute modelleerimiseks tuleb kasutada tavalist vooluallikat (vt. joonis 4.22), kus sisestatakse vajalik harmooniku amplituud, sagedus, faasinihe ja rambi kestus. Vooluallika bloki konfiguratsiooni tabel on esitatud allpool (vt. joonis 4.23). Juhul kui on vajalik sisestada erinevate sagedustega või amplituudiga vooluharmonikuid, siis tuleb kasutada mitut vooluallika blokki.

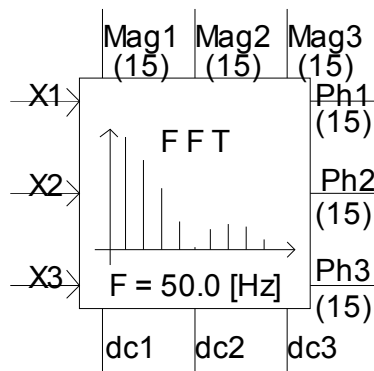


Joonis 4.22 Vooluallika kasutus vooluharmonikute modelleerimiseks



Joonis 4.23 Vooluallika dialoogiaken vooluharmonikute modelleerimisel

Harmonikute sisalduse analüüsimiseks kasutatakse *On-Line Frequency Scanner (FFT)* blokk (vt. joonis 4.24). Antud blokk määrab sisendsignalis harmoonikute amplituudid. Seda blokki saab kasutada nii pinge, kui ka voolu harmoonikute sisalduse visualiseerimiseks.



Joonis 4.24 Harmoonikute tuvastatav blokk

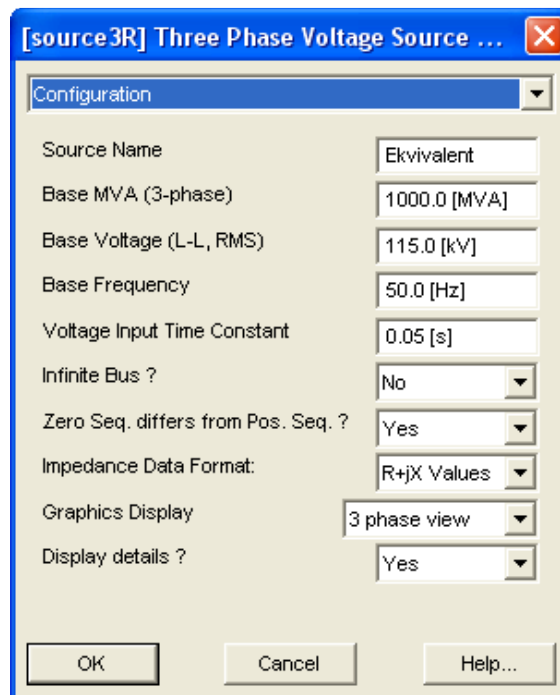
5. Elektrirongi mudeli talitluse mõjude analüüsimine elektrisüsteemis

Antud peatükis uuritakse kuidas elektrirongi talitus mõjutab elektrisüsteemi pinget, koormuste jagunemist faaside vahel ja pingesümmeetriat. Veoalajaamades kasutatakse peamiselt kolme tüüpi ühendus trafot. Trafoühenduse tüübist sõltub elektrirongi mõju elektrisüsteemi talitlusele. Käesolevas peatükis ühendatakse elektrirongi mudelid elektrisüsteemiga kasutades kolme tüüpi trafot ning võrreldakse saadud tulemusi.

Peatükk 5.1 kajastab modelleerimisel kasutatavaid elektrisüsteemi, trafode ning elektrirongi mudeleid. Peatükis 5.2 antakse ülevaade modelleerimisel kasutatavast koormus karakteristikust. Peatükkides 5.3 ja 5.4 vaadeldakse modelleerimisel saadud tulemusi ning antakse tulemuste analüüs. Lisaks peatükis 5.5 uuritakse elektrirongi talitlusest tekkivaid pinget kõrgemad harmoonikuid elektrisüsteemis.

5.1. Elektrisüsteemi, trafode ning elektrirongi mudelid

Elektrisüsteemi ekvivalent on modelleeritud veoalajaama ülempinge lattidel pingesallikana, mille lähteandmed on määratud lõputöö juhendaja poolt. Elektrisüsteemi ekvivalendi mudeli seadistus on esitatud allpool joonisel 5.1.

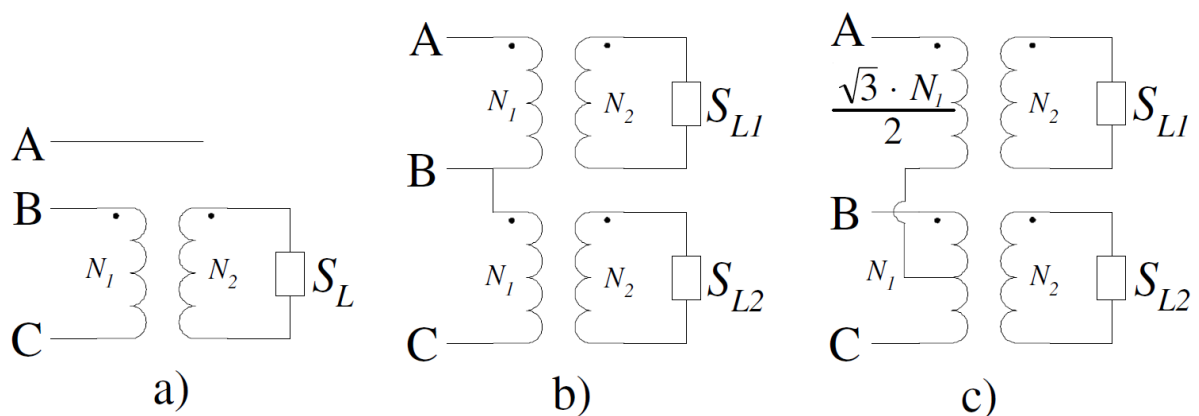


Joonis 5.1 Elektrisüsteemi ekvivalendi mudeli seadistus

Rail Balticu projekti raames on planeeritud ühendada raudtee kontaktvõrk Eesti elektrisüsteemi 110 kV võrguga. Seega modelleeritava elektrisüsteemi nimipinge on valitud 115 kV. Elektrisüsteemi mudeli kasutatud pärijärgnevustakistuse väärtus on $0,81 + j13,2$ oomi ning nulljärgnevustakistuse väärtus on $0,87 + j8,61$ oomi.

Tulenevalt asjaolust, et elektrivedurid on ühefaasilised koormused, siis mõjutab olulisel määral veolajaamades kasutatava trafo tüüp elektriraudtee koormusest tingitud mõjusid elektrisüsteemi pingekvaliteedile. Veolajaamades kasutatakse laialdaselt kolme peamist trafo tüüpi. Nendest kõige tavalisem on ühefaasiline trafo, mis ühendatakse kahe faasi vahel ning ülejäänud kaks eritüüpse ühendusega trafod, kus kolmefaasiline toitepinge konverteeritakse kaheks ühefaasiliseks vooloringiks [95].

Eritrafodest on rohkem levinud Scott- ja V-ühendusega trafod. Kolme veolajaamades laialdaselt kasutatavad trafo tüübi skeemid on esitatud allpool joonisel 5.2.



Joonis 5.2 Veolajaamades kasutatavate trafode tüübid
 a) ühefaasiline trafo, b) V-ühendusega trafo, c) Scott-ühendusega trafo [95]

Käesolevas töös on kõigi trafode nimivõimsuseks valitud 25 MVA, mis on piisav vaadeldavate vedurimudelite elektritoiteks. Antud töö raames ei uurita kontaktvõrgu iseloomu ning sellest tulenevat mõju elektrisüsteemi pingekvaliteedile ning kontaktvõrk on modelleeritud ideaalse juhina.

Kaasaegsed kiirraudtee elektrirongid koosnevad kahest vedurist. Eeldame, et meie juhul on tegemist raske kaubarongiga, mida veavad kaks vedurit. Seega modelleerimisel koosneb elektrirong kahest ülalpool modelleeritud vedurist regeneratiivse pidurdamisega (vt. peatükk 4.6). Eeldatakse, et kaks vedurit rongis talitlevad identse koormusgraafiku järgi. Seega rongi mudel koosneb kahest rööpselt ühendatud vedurist, mis oli toodud ülalpool joonisel 4.13.

5.2. Rongide arv ja nende koormusgraafik

Praktikas võib juhtuda nii, et ühest vealajaamast saavad mitmed elektrirongid. Käesolevas töös eeldame maksimaalseks koormuseks kahe raske kaubarongi sattumist ühe vealajaama piirkonda. Seega modelleerimisel skeem koosneb kahest rongist, kusjuures ühefaasilise trafo korral mõlemad koormused on ühendatud samale faasile, aga Scott- ja V-ühendusega trafode korral rongid on ühendatud erinevatele faasidele. Lisas L.2 on toodud *PSCAD*-i mudel kahe rongi talitluse mõju analüüsimisel Scott-trafo korral.

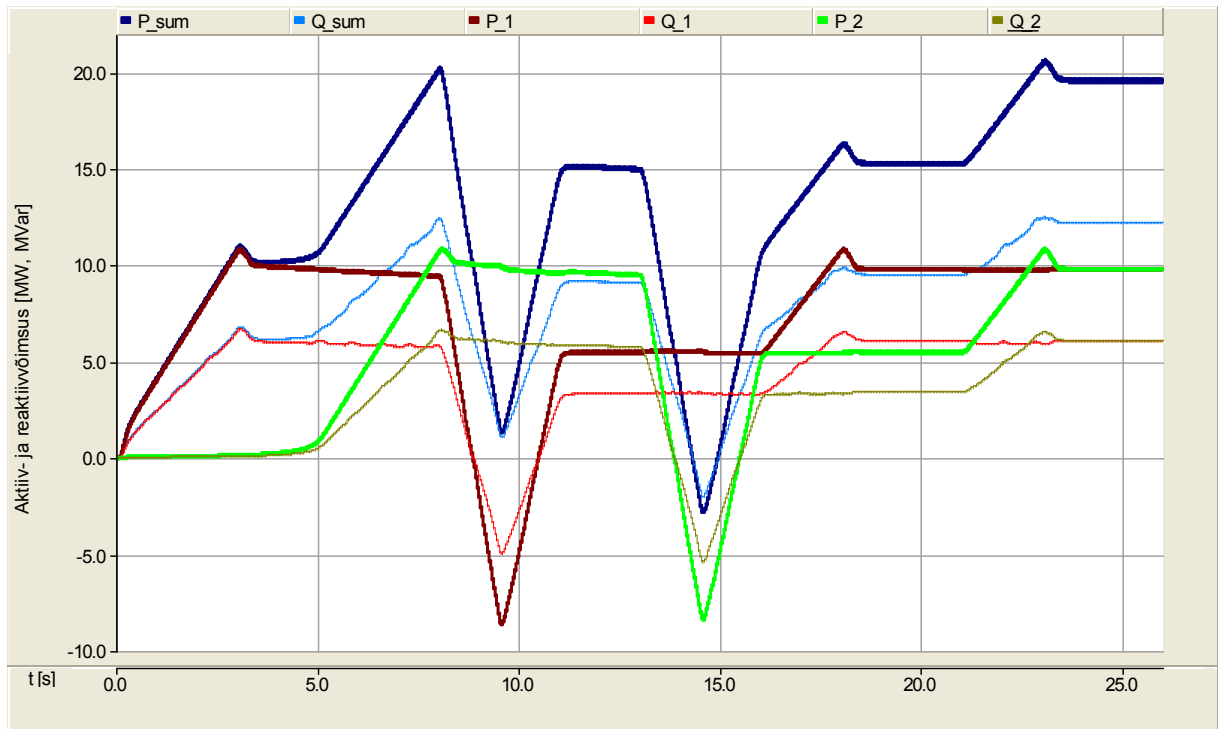
Kuna praktikas kahe rongi koormusgraafikud ei ühti ajas, siis tuleb modelleerimisel vaadelda järgmisi halvimaid koormusjuhtumeid, mis mõjutavad suuremal määral elektrisüsteemi talitlust:

- talitleb ainult üks rong, kusjuures koormus muutub nullist maksimumini
- ühel rongil on täiskoormus, teisel rongil on poolkoormust
- mõlematel rongidel on maksimaalsed koormused
- ühe rongi regeneratiivse pidurdamise ajal on teisel rongil poolkoormus
- ühe rongi regeneratiivse pidurdamise ajal on teisel rongil täiskoormus

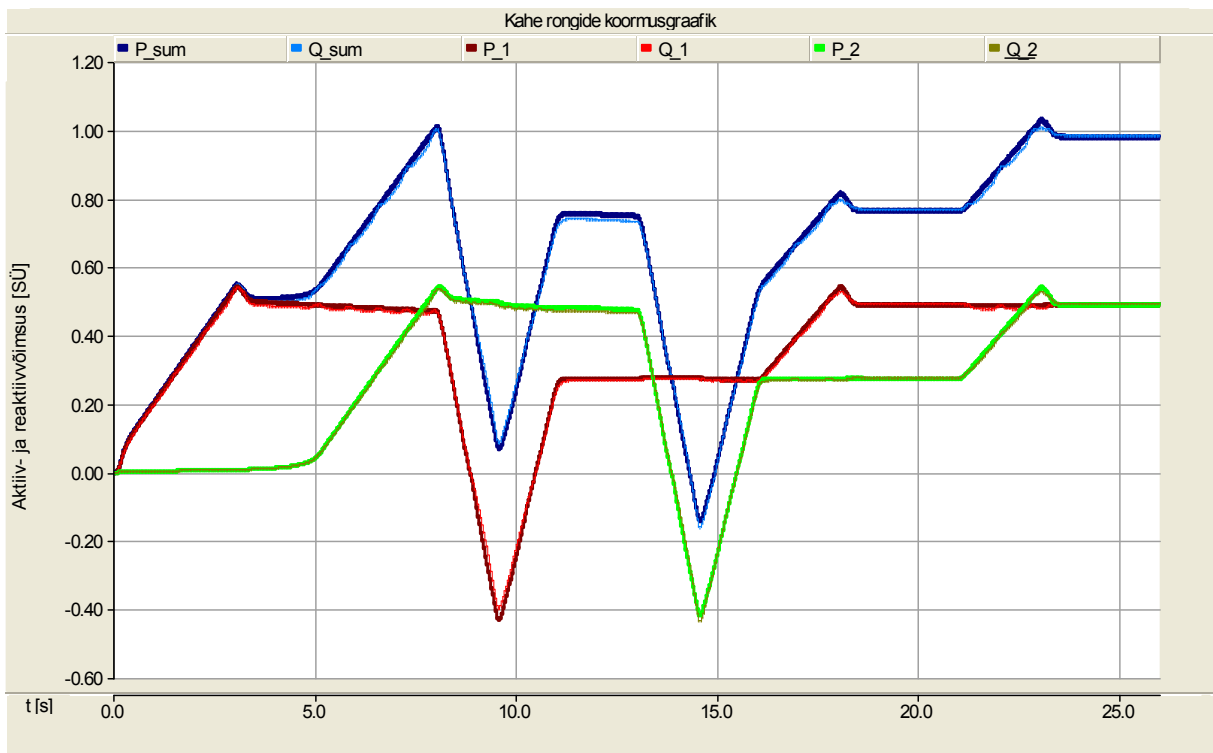
Selle koormusgraafiku saamiseks võetakse aluseks punktis 4.3 vaadeldud ühe veduri koormusgraafik, mille koormust suurendatakse kaks korda ning kasutatakse esimese rongi koormusgraafikuna. Teise rongi koormusgraafikuna kasutatakse sama karakteristikut, mis ajaliselt nihutatakse viie sekundi võrra, ehk käivitatakse viis sekundit hiljem. Selle pärast modelleerimise aega pikendatakse viie sekundi võrra. Saadud rongide koormusgraafik on esitatud allpool joonisel 5.3, kus on näidatud iga rongi summaarsed aktiiv-, ja reaktiivvõimsused. Antud koormusgraafikul esinevad kõik ülalpool toodud kahe rongi koormusjuhtumid, seega seda võib kasutada elektrirongide talitluse mõju analüüsimiseks.

Kuna universaalsuse mõttes kasutatakse tulemuste esitamisel viisi suhtelistes ühikutes, siis kahe rongi koormusgraafik on esitatud allpool joonisel 5.4 suhtühikutes. Suhtelise ühikuna kasutatakse kahe rongi nimivõimsuse summat, vastavalt 20 MW ning 17 MVar. Suhteliste ühikute kasutamine võimaldab ilma ümberarvutusteta hinnata elektrisüsteemi kvaliteedi normatiivide täitmist ning võrrelda erinevates uurimistöodes saadud tulemusi, kus on kasutatud erinevad pingesüsteeme või rongide nimivõimsusi.

liinipingete graafikud on esitatud allpool suhtühikutes elektrisüsteemi nimipinge (115 kV) suhtes. Protsentides on esitatud näiteks pingesümmeetria, kuna see on laialdaselt kasutatud antud parameetri mõõtühik.



Joonis 5.3 Kahe rongide modelleerimise koormusgraafik, naturaälühikutes



Joonis 5.4 Kahe rongide modelleerimise koormusgraafik, suhtühikutes

Vastavalt ülalpool toodud joonisele 5.4 kahe rongi summaarne aktiivkoormus muutub vahemikus -0,1 kuni 1,03 sü. Samal ajal iga rongi aktiivkoormus muutub vahemikus -0,44 kuni 0,54 sü.

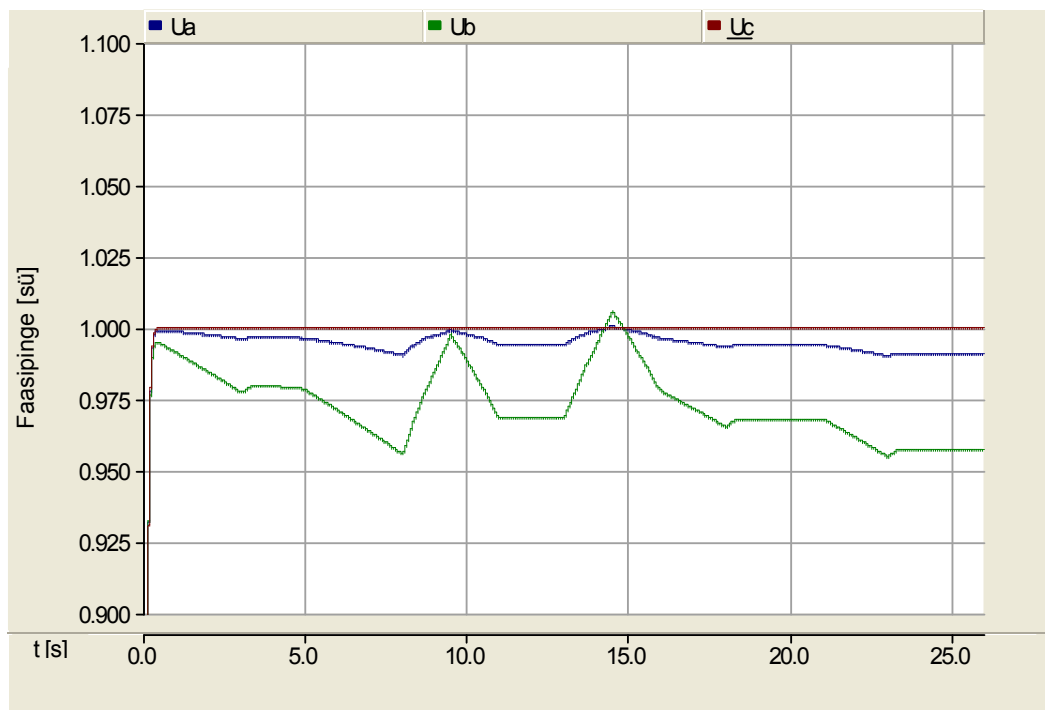
5.3. Modelleerimise tulemused

Allpool on toodud elektrirongide talitluse mõju elektrisüsteemi pinge muutusele, koormuste jagunemisele faaside vahel ja pingeasümmeetriale.

5.3.1. Elektrisüsteemi pinge muutus

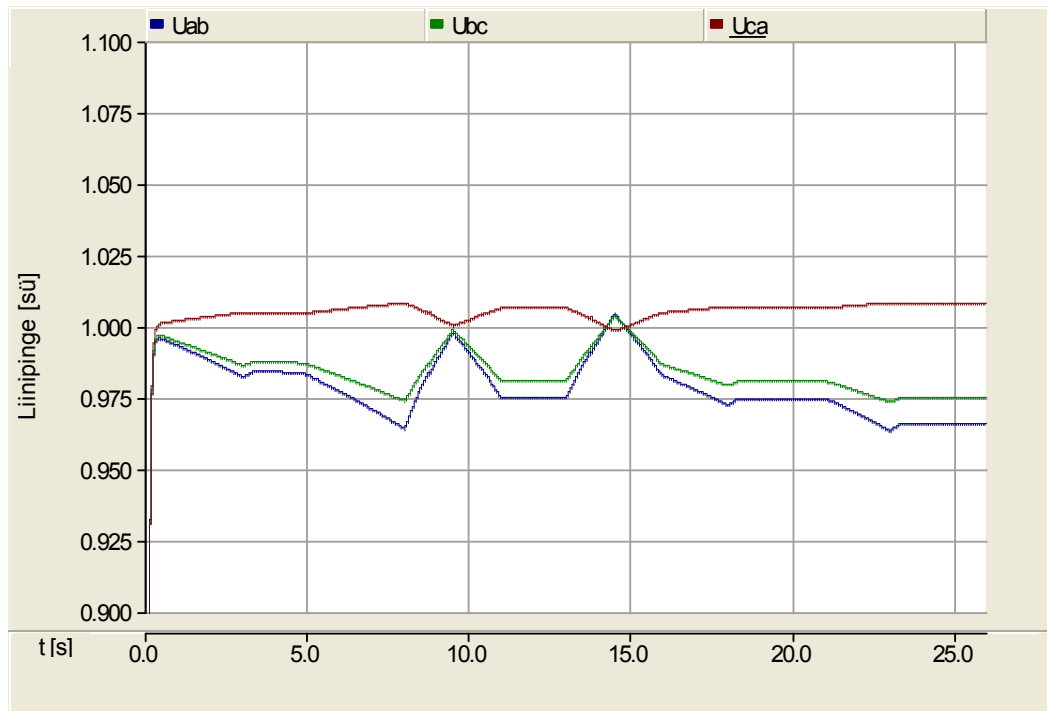
- ühefaasilise trafo puhul simulatsioonide tulemused

Ühefaasilise trafo puhul elektrisüsteemi faasipingete graafik on esitatud allpool joonisel 5.5. Elektrisüsteemi ekvivalentne toiteallikas on tähtühenduses ning ühefaasiline trafo on ühendatud faaside A ja B vahele. Seoses sellega faasi C pinge U_C ei muutu modelleerimise käigus. Elektrirongide talitus mõjutab suurel määral faasi B pinget U_B , mille maksimaalne hälve on 0,045 sü. Seejuures ei mõjutanud elektrirongide talitus faasi A pinget U_A ning faasi A pinge maksimaalne hälve on 0,01 suhtühikut. Antud erinevus on põhjustatud ebavõrdse reaktiivkoormuse jagunemisel faaside vahel, mida on vaadeldud allpool peatükis 5.3.2 (vt. joonis 5.11 ja joonis 5.12).



Joonis 5.5 Ühefaasilise trafo puhul elektrisüsteemi faasipingete graafik

Joonisel 5.6 on esitatud elektrisüsteemi liinipingete graafik ühefaasilise trafo korral. Seoses sellega, et faasil B on kõige suurim pinge hälve, siis faasiga B seotud liinipingete U_{AB} ja U_{BC} hälbed on praktiliselt võrdsed ning palju suuremad võrreldes faaside CA vahelise pinge U_{CA} hälbega. Ühefaasilise trafo korral liinipinge maksimaalne hälve võrdub 0,036 sü.

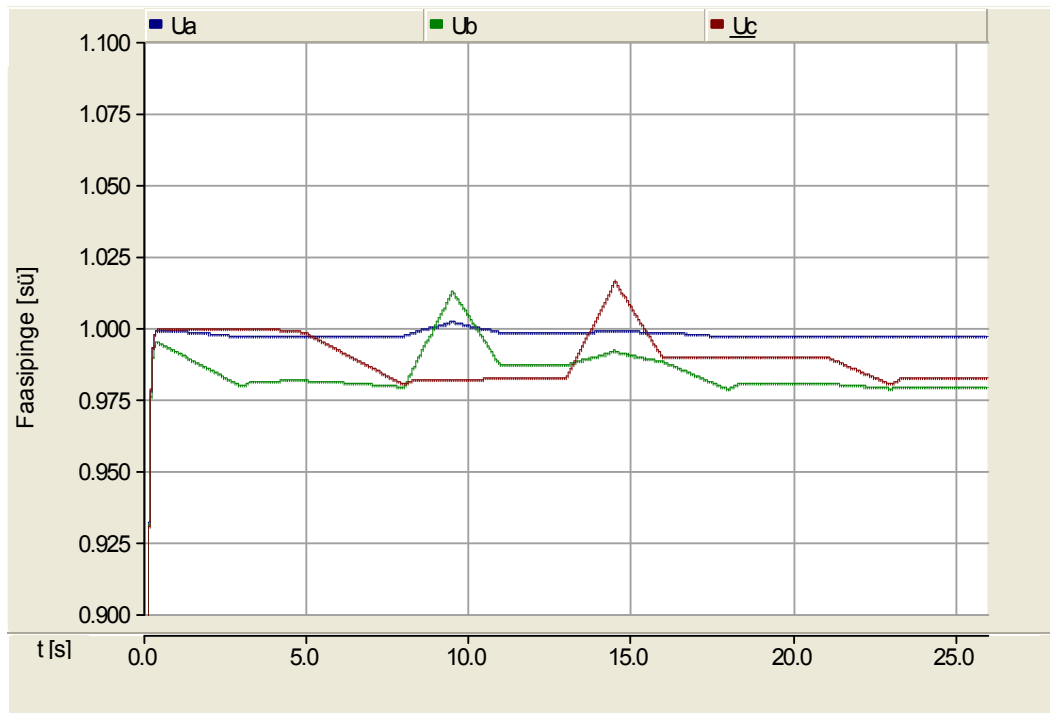


Joonis 5.6 Ühefaasilise trafo puhul elektrisüsteemi liinipingete graafik

Kuna ühefaasilise trafo korral on mõlemad elektrirongid ühendatud rööpselt elektrisüsteemi kahe faasi vahele, siis elektrisüsteemi talitluse seisukohast mõlemad elektrirongid moodustavad ühise koormuse. See on visuaalselt nähtav pingegraafikute järgi, kuna pingegraafikute kuju on sarnane rongide summaarse koormusgraafikuga (vt. joonis 5.3), kuid vastassuunaline. Seega ühefaasilise trafo korral esinevad maksimaalsed faasi- ja liinipingete hälbed.

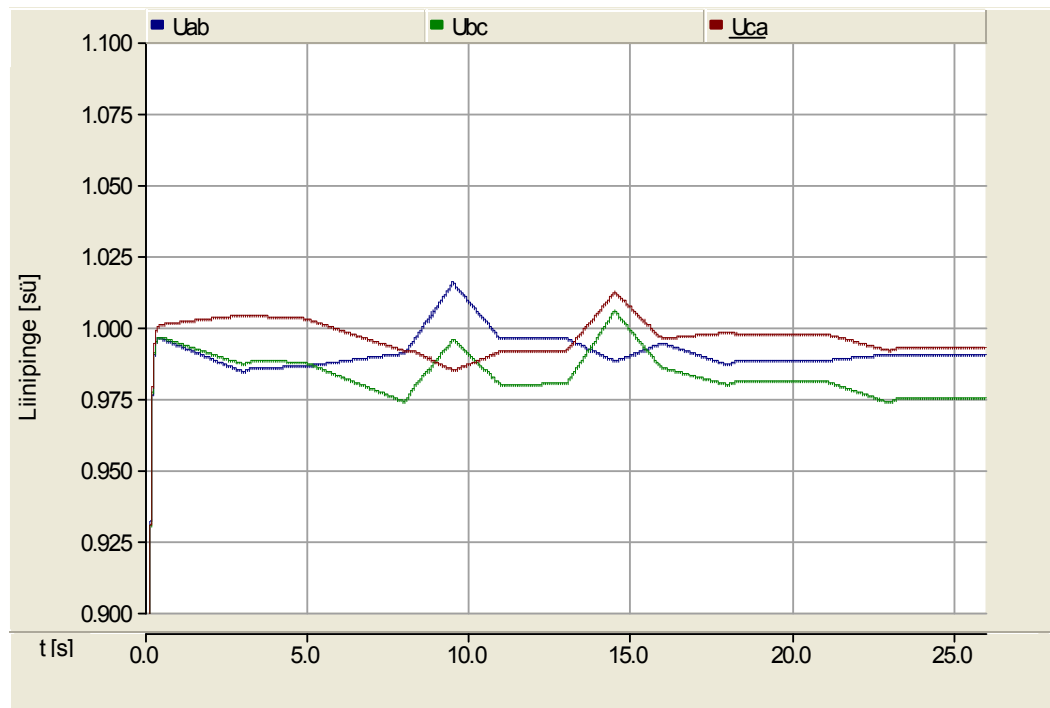
- **V-ühendusega trafo simulatsioonide tulemused**

Vastavalt faasipingete graafikule (vt. joonis 5.7), ei mõjuta elektrirongide talitlemine faasi A pinget U_A . Faasi B pinge U_B graafik ühtib esimese rongi koormuse muutumisega. Faasi C pinge U_C graafik ühtib teise rongi koormuse muutumisega. Kuna pinge on otseselt seotud reaktiivkoormusega, saab sellest järeldada, et esimese rongi reaktiivkoormus koormab faasi B ning teise rongi reaktiivkoormus analoogselt faasi C. Seejuures faas A on koormatud vähesel määral reaktiivkoormusega. Peatükis 5.3.2 on toodud koormuste jaotus faaside vahel V-ühendusega trafo korral (vt. joonis 5.13 ja joonis 5.14). Faasipinge maksimaalne hälve võrdub 0,022 sü ning esineb mis tahes trafosekundaarfaasi maksimaalsel koormusel. Samal ajal regeneratiivsel pidurdamisel faasipingete hälbed on peaaegu võrdsed faasipingete hälbele maksimaalsel koormusel.



Joonis 5.7 V-ühendusega trafo puhul elektrisüsteemi faasipingete graafik

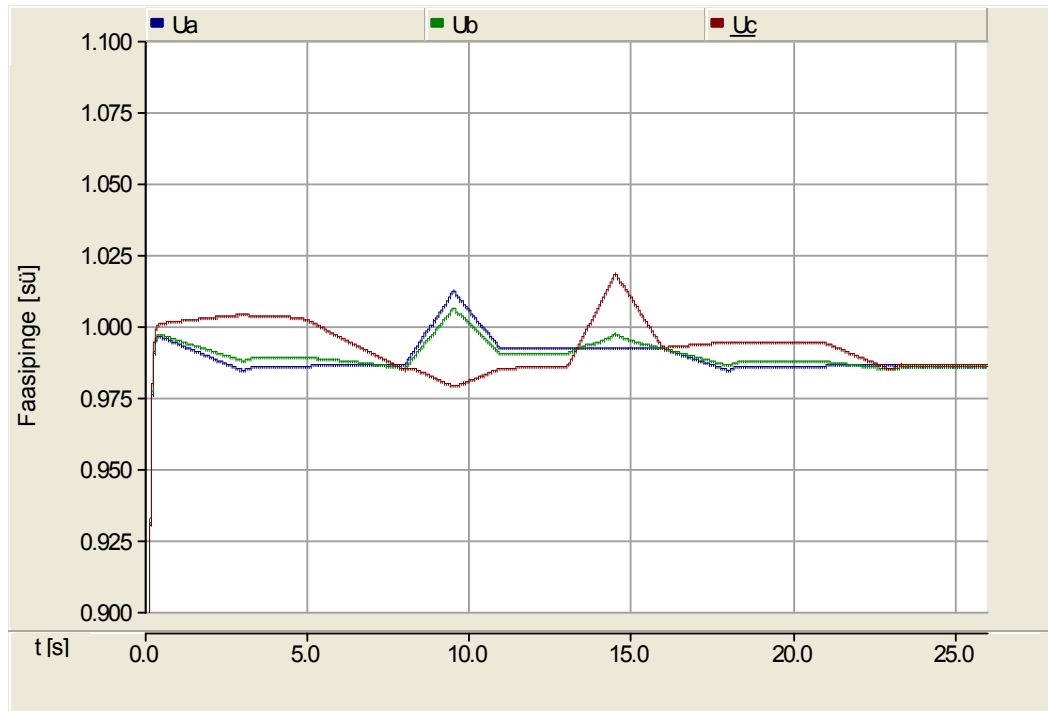
Kõik kolm liinipinget on mõjutatud elektrirongi talitlusest, kus enim on mõjutatud faaside BC liinipinge U_{BC} (vt. joonis 5.8). Maksimaalne liinipinge hälve on 0,026 sü. Siinkohal on oluline pöörata tähelepanu sellele, et V-trafo mõlema väljundfaasi sümmeetrilisel koormamisel (modelleerimine alates 23,5 sekundist) säilib suur faasi- ja liinipingete erinevus.



Joonis 5.8 V-ühendusega trafo puhul elektrisüsteemi liinipingete graafik

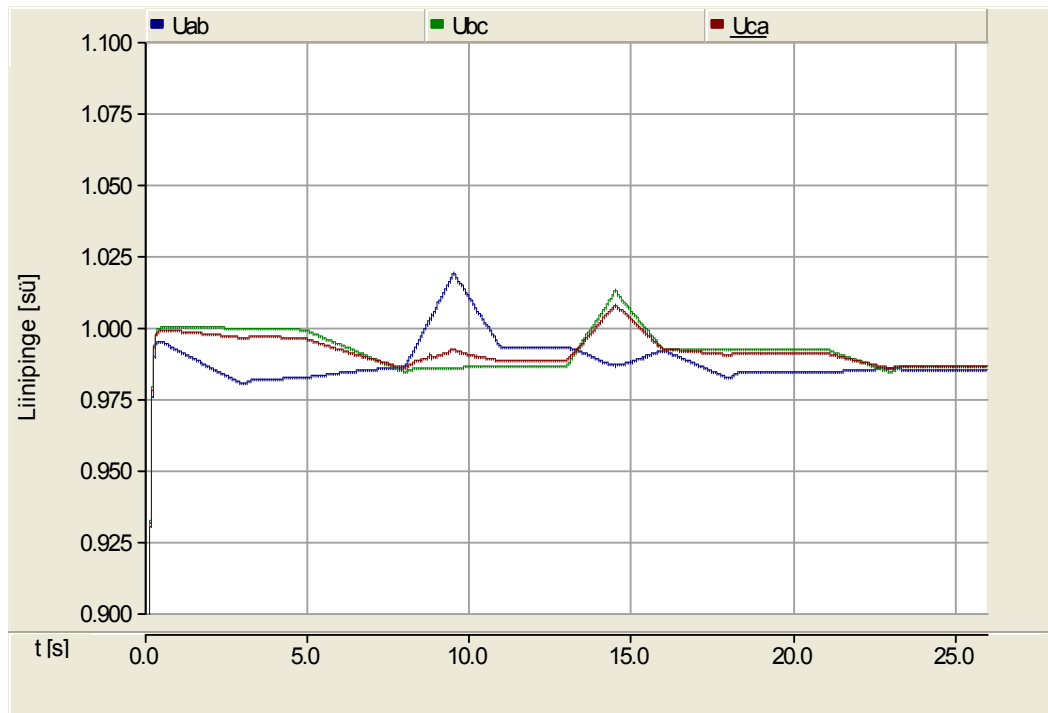
- **Scott-ühendusega trafo simulatsioonide tulemused**

Vastavalt faasipingete graafikule (vt. joonis 5.9) Scott-ühendusega trafo puhul on kõigi kolme faasi pinged mõjutatud elektrirongi talitlusest. Faaside A ja B pingegraafikud U_A ja U_B ühtivad esimese rongi koormuse muutusega. Faasi C pingegraafik ühtib rongi 2 koormuse muutusega. Faasipinge maksimaalne hälve esineb regeneratiivsel pidurdamisel ning võrdub 0,022 sü., seejuures on oluline pöörata tähelepanu sellele, et Scott-trafo mõlema väljundfaasi sümmeetrilise koormuse korral (modelleerimine alates 23,5 sekundist) on faasipinged omavahel võrdsed.



Joonis 5.9 Scott-ühendusega trafo puhul elektrisüsteemi faasipingete graafik

Kõik kolm liinipinget U_{AB} , U_{BC} ja U_{CA} on mõjutatud elektrirongide talitlusest. Vastavalt modelleerimise tulemusele (vt. joonis 5.10) saab järeldada, et Scott-ühendusega trafo puhul väljaspool regeneratiivse pidurdamise piirkonda on liinipingete väärtuste erinevus marginaalne. Graafikud on päris lähedased, väljaarvatud pidurdamise aegadel (modelleerimisel 10 ja 15 sekundi juures) ning trafo asümmeetrilise koormuse korral (modelleerimisel kuni 8 sekundini). Scott-trafo mõlema väljundfaasi faasipinged on omavahel praktiliselt võrdsed sümmeetrilise koormuse korral (modelleerimine alates 23,5 sekundit). Graafikult on näha, et esimese rongi regeneratiivne pidurdamine mõjutab faaside AB liinipinget U_{AB} ning teise rongi regeneratiivne pidurdamine mõjutab faaside BC ja CA liinipinget U_{BC} ja U_{CA} .



Joonis 5.10 Scott-ühendusega trafo puhul elektrisüsteemi liinipingete graafik

Antud peatükis toodud modelleerimise tulemused näitavad, et igal trafo ühendusel on erinev mõju elektrisüsteemi faasi- ja liinipingetele. Allpool on vaadeldud, kuidas jaguneb koormus elektrisüsteemi faaside vahel erinevate trafo ühenduste korral.

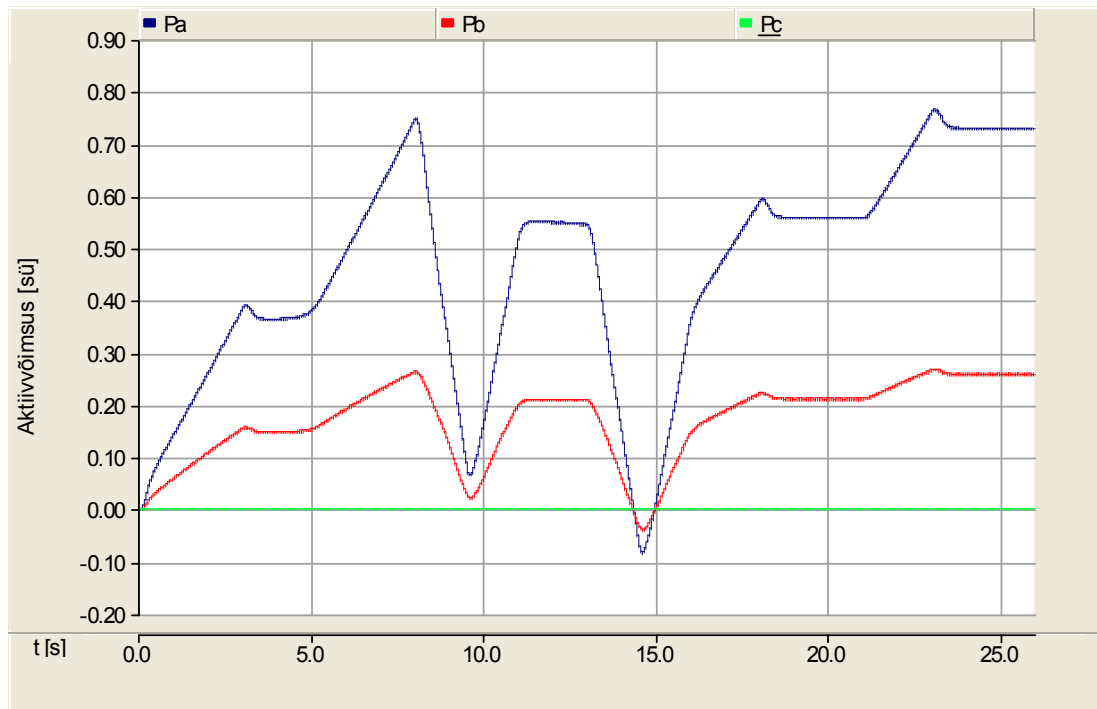
5.3.2. Elektrisüsteemi koormuste jagunemine faaside vahel

- **ühefaasilise trafo puhul simulatsioonide tulemused**

Vastavalt allpool toodud joonistele 5.11 ja 5.12 ühefaasilise trafo korral on ebavõrdne nii aktiiv- kui reaktiivkoormuse jaotus elektrisüsteemi faaside vahel.

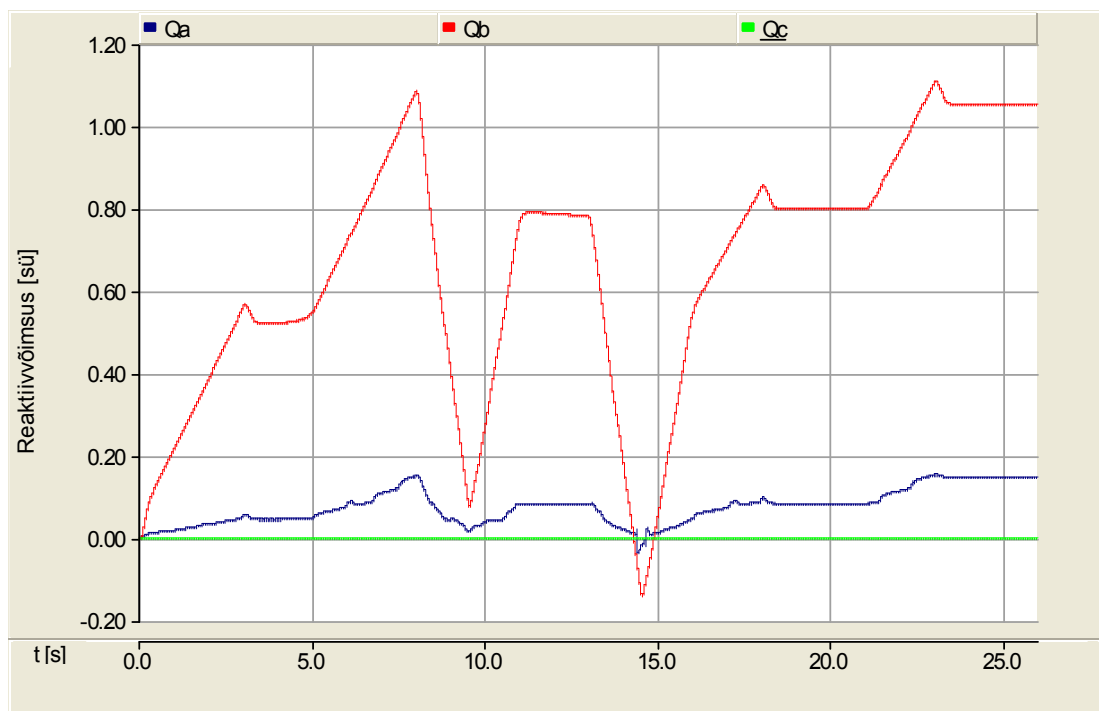
Koormuse ebavõrdne jagunemine süsteemi faaside vahel sõltub süsteemi faaside faasinurkadest, mille vahele ühendatakse koormus. Modelleerimisel koormus on ühendatud faaside A ja B vahele, kusjuures faasi A algfaasinurk $\psi_A = 0^\circ$ ning faasi B algfaasinurk $\psi_B = -120^\circ$. Seega faas A on ees faasist B. Eesolev faas, antud juhul faas A koormub enamasti aktiivkoormusega. Mahajääv faas, antud juhul faas B koormub enamasti reaktiivkoormusega. Antud teoreetilisele selgitusele vastavad allpool toodud koormusgraafikute analüüsi tulemused.

Vastavalt allpool joonisele 5.11 võtab faas A enda peale kahe rongi aktiivkoormuse suurema osa (ca 75 %). Faas B võtab enda peale kahe rongi aktiivkoormuse ülejäänud osa (ca 25 %), ning faas C ei ole üldse koormatud.



Joonis 5.11 Ühefaasilise trafo puhul faaside vahel aktiivkoormuste jagunemise graafik

Samal ajal vastavalt allpool joonisele 5.12 faasi A reaktiivkoormus on suhteliselt madal, mille maksimaalne väärtus on ca 10% kahe rongi summaarsest reaktiivkoormusest. Suurem osa reaktiivkoormusest kuni 110% edastatakse faasi B kaudu, ning faas C ei ole üldse koormatud.



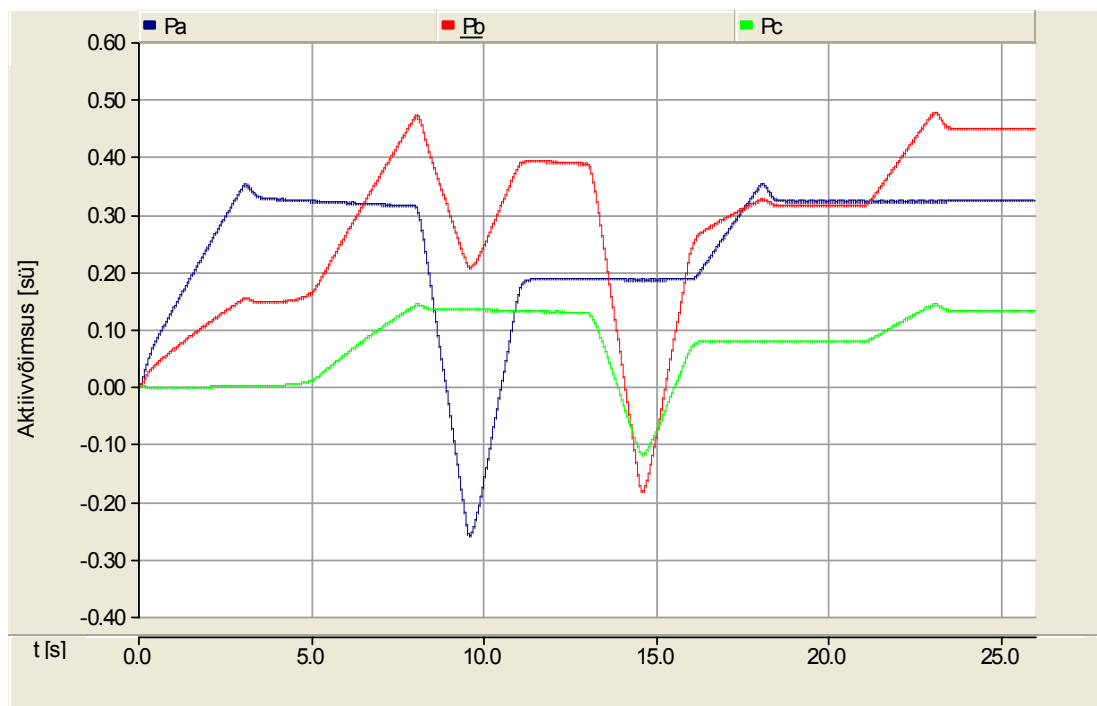
Joonis 5.12 Ühefaasilise trafo puhul faaside vahel reaktiivkoormuste jagunemise graafik

Seega ühefaasilise trafo korral on kriitiliselt asümmeetriline nii aktiiv- kui ka reaktiivkoormuste jagunemine faaside vahel, kusjuures üks faas ei ole üldse koormatud, teine faas on koormatud põhiliselt aktiivkoormusega, ning kolmas faas on koormatud põhiliselt reaktiivkoormusega.

Reaktiivkoormuse jagunemine faaside vahel mõjutab faasipinget. Seoses sellega, et faasis B on suurim reaktiivkoormus, siis on kõige rohkem mõjutatud faasi B pinget (vt. joonis 5.5).

- **V-ühendusega trafo simulatsioonide tulemused**

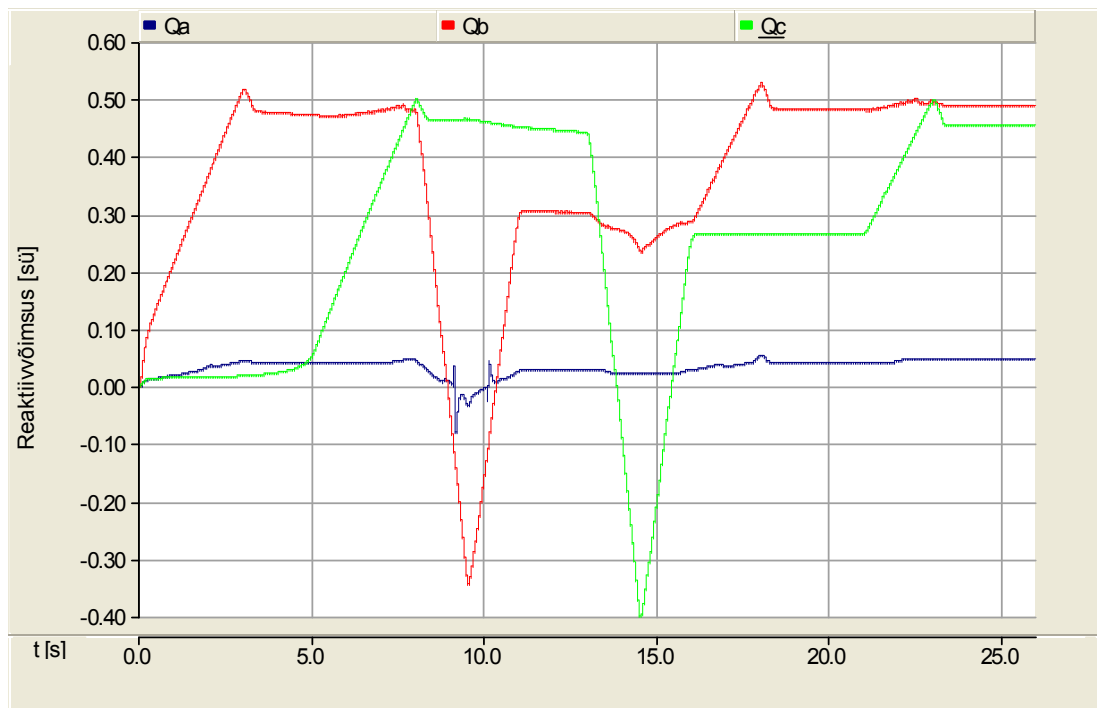
Vastavalt allpool toodud koormusgraafikule (vt. joonis 5.13) V-ühendusega trafo korral on enam (ca 75%) esimese rongi aktiivkoormusest koormab faasi A. Teise rongi ca 30% aktiivkoormusest seejuures faasi C. Ülejäänud esimese rongi ning teise rongi aktiivkoormus koormab faasi B, kusjuures faasis B esineb suurim aktiivkoormuse muutus ajas ning on kõige enam mõjutatud koormuse poolt. Seega faas C on kõige vähem koormatud aktiivkoormusega vaid 15% summaarsest koormusest. Ülejäänud koormus on suhteliselt võrdselt jaotatud faaside A ja B vahel. Tuleb pöörata tähelepanu, et trafo väljundfaaside sümmeetrilisel koormusel on aktiivkoormuste jagunemine elektrisüsteemi faaside vahel ebasümmeetriline. V-ühendusega trafo korral ühe faasi maksimaalne koormus 0,48 suhtühikut. V-ühendusega trafo korral regeneratiivsel pidurdamisel, ühe faasi kaudu edastatud maksimaalne aktiivvõimsus võrdub 0,2 suhtühikuga.



Joonis 5.13 V-ühendusega trafo puhul faaside vahel aktiivkoormuste jagunemise graafik

Vastavalt allpool toodud koormusgraafikule (vt. joonis 5.14) V-ühendusega trafo korral ei koormata faasi A reaktiivvõimsusega. Faas B on koormatud esimese rongi reaktiivvõimsusega ning faas C on koormatud teise rongi reaktiivvõimsusega. Seega V-ühendusega trafo korral reaktiivvõimsuse jagunemine toimub vaid kahe faasi vahel, kusjuures iga faasi koormatus vastab trafo väljundfaasi koormatusele ehk poolele summaarsele koormusele.

V-ühendusega trafo mõlema väljundfaasi sümmeetrilise koormuse korral (vt modelleerimist alates 23,5 sekundit) on elektrisüsteemi faaside vahel reaktiivkoormuste jagunemine ebasümmeetriline, kuna üks faas on koormatud vähesel määral ning ülejäänud kaks faasi on suhteliselt võrdselt koormatud. V-ühendusega trafo korral regeneratiivsel pidurdamisel ühe faasi kaudu edastatud maksimaalne reaktiivvõimsus võrdub 0,4 suhtühikuga.

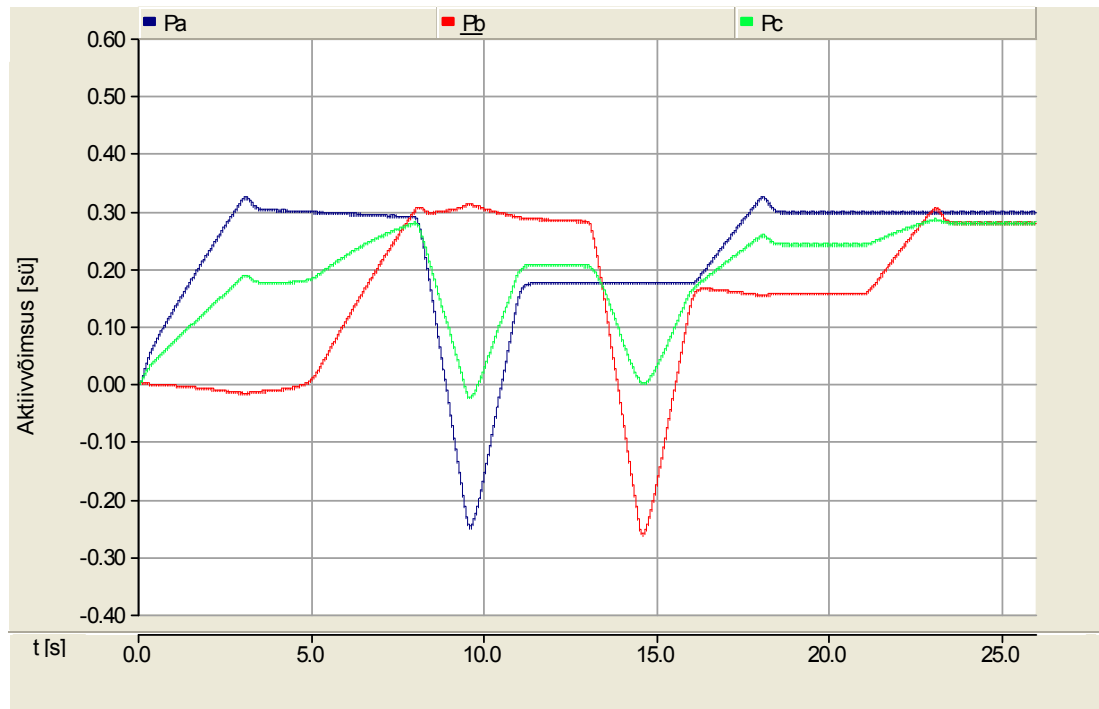


Joonis 5.14 V-ühendusega trafo puhul faaside vahel reaktiivkoormuste jagunemise graafik

- **Scott-ühendusega trafo simulatsioonide tulemused**

Vastavalt allpool toodud koormusgraafikule (vt. joonis 5.15) on Scott-ühendusega trafo korral faas A koormatud ca 60% esimese rongi aktiivkoormusest ning sama palju (ca 60%) teise rongi aktiivkoormusest koormab faasi B. Faas C katab ülejäänud esimese faasi aktiivkoormusest ning teise väljundfaasi koormusest, kusjuures faasi C koormus võrdub ligikaudselt faaside A ja B koormuste aritmeetilise keskmisega. Seega on tagatud enam-vähem võrdne aktiivkoormuse jagunemine elektrisüsteemi faaside vahel. Trafo sümmeetrilise koormuse korral on aktiivkoormus jagatud võrdselt elektrisüsteemi faaside vahel.

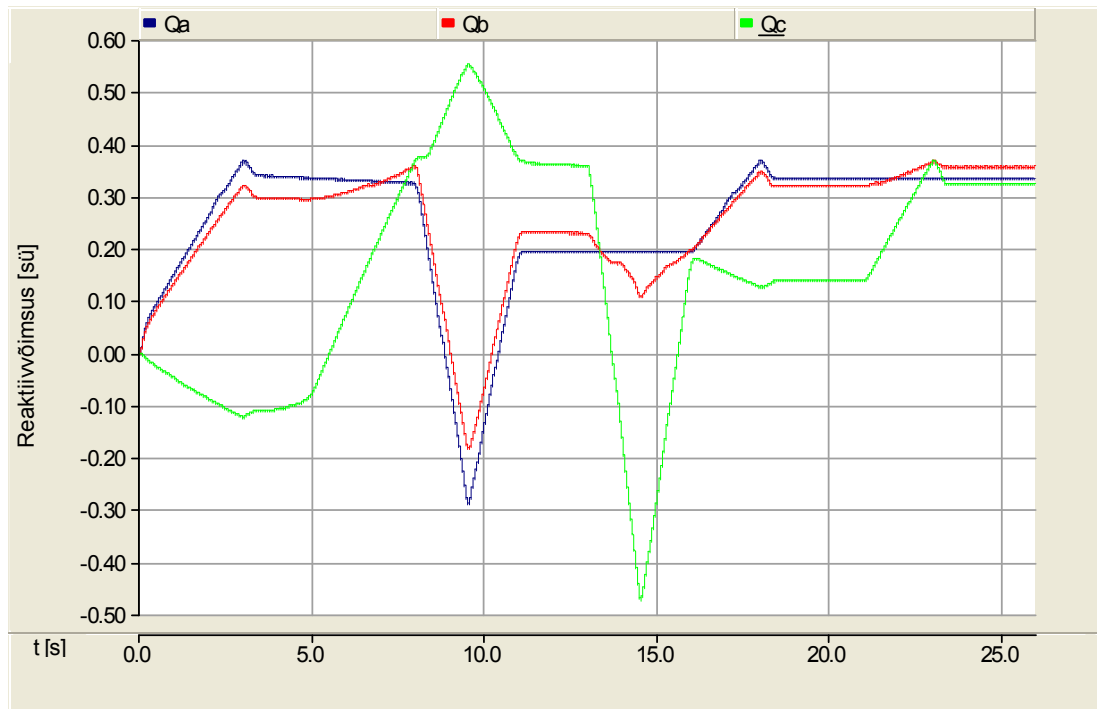
Scott-ühendusega trafo korral regeneratiivsel pidurdamisel ühe faasi kaudu edastatud maksimaalne aktiivvõimsus võrdub 0,25 suhtühikuga.



Joonis 5.15 Scott-ühendusega trafo puhul faaside vahel aktiivkoormuste jagunemise graafik

Vastavalt allpool toodud koormusgraafikule (vt. joonis 5.16) Scott-ühendusega trafo korral on faasid A ja B praktiliselt võrdselt koormatud reaktiivkoormusega, kusjuures iga faas võtab 60% esimese rongi reaktiivkoormusest. Faas C siis annab teise rongi reaktiivvõimsuse ning samal ajal juhul kui summaarse reaktiivkoormuse tarbimine on väiksem, kui 1,2 kordne esimese rongi koormus, siis faasi C kaudu tagastatakse võrku liigne reaktiivvõimsus. Samasugune situatsioon toimub ka esimese rongi regeneratiivsel pidurdamisel, kui summaarne regenereeritud võimsus on väiksem kui 1,2 kordne esimese rongi regenereeritud võimsus, siis faasi C kaudu võetakse võrgust ülegenereeritud reaktiivvõimsus. Seega suure asümmeetrilise koormuse korral ei ole antud trafo väljundfaaside reaktiivvõimsuse jagunemine elektrisüsteemi faaside vahel võrdne (vt. modelleerimise ajavahemik nullist kuni 8 sekundit). Samal ajal trafo sümmeetrilise koormuse korral on tagatud suhteliselt võrdne reaktiivkoormuse jagunemine elektrisüsteemi faaside vahel.

Scott-ühendusega trafo korral regeneratiivsel pidurdamisel ühe faasi kaudu edastatud maksimaalne reaktiivvõimsus võrdub 0,46 suhtühikuga.



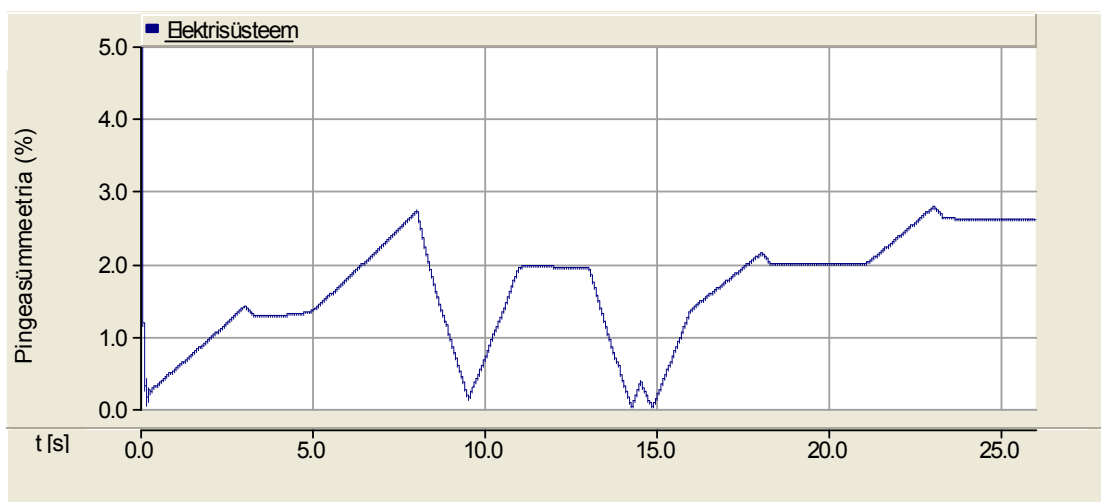
Joonis 5.16 Scott-ühendusega trafo puhul faaside vahel reaktiivkoormuste jagunemise graafik

Reaktiivtakistuse asümmeetriline jagunemine mõjutab faasipingeid, mis omakorda põhjustab pingesümmeetriat. Pingesümmeetria on vaadeldud peatükis 5.3.3.

5.3.3. Elektrisüsteemi pingesümmeetria modelleerimise tulemused

- ühefaasilise trafo puhul modelleerimise tulemused

Ühefaasilise trafo puhul pingesümmeetria graafiku kuju (vt. joonis 5.17) ühtib summaarse koormusgraafiku kujuga (vt. joonis 5.4).

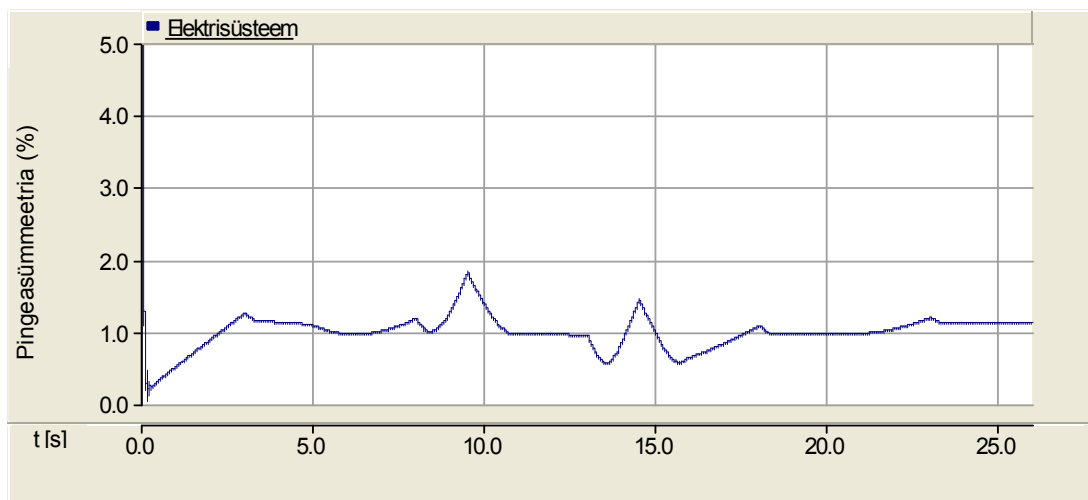


Joonis 5.17 Ühefaasilise trafo puhul pingesümmeetria graafik

Pingesümmeetria väärtus suureneb koormuse suurenemisel, ning vähendab koormuse vähendamisel. Pingesümmeetria maksimaalne väärtust võrdub 2,77%.

- **V-ühenduse trafo puhul modelleerimise tulemused**

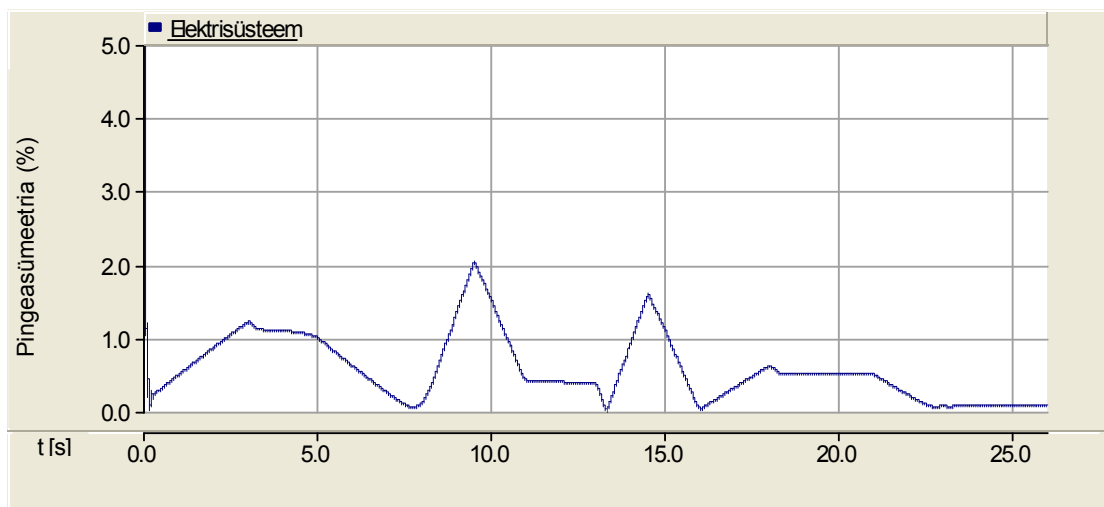
Vastavalt allpool joonisele 5.18 V-ühendusega trafo puhul pingesümmeetria hoitakse väärtusel 1%. Trafo väljundfaaside asümmeetrilisel koormusel pingesümmeetria erineb väärtusest 1%, kusjuures maksimaalse hälve on 0,77%.



Joonis 5.18 V-ühendusega trafo puhul pingesümmeetria graafik

- **Scott-ühendusega trafo modelleerimise tulemused**

Vastavalt allpool joonisele 5.19 Scott-ühendusega trafo puhul pingesümmeetria on nulli lähedane sümmeetrilise koormuse korral, aga asümmeetrilise koormuse korral saavutab väärtuse kuni 2,05%.



Joonis 5.19 Scott-ühendusega trafo puhul pingesümmeetria graafik

5.4. Tulemuste võrdlus ja analüüs

Ülalpool modelleeritud elektrisüsteemi pingemuutuse, koormuste jagunemise faaside vahel ja pingesümmeetria tulemuste põhiparameetrid on esitatud allpool tabelis 5.1. Tabelis on esitatud modelleerimise käigus saadud maksimaalsed väärtused.

Tabel 5.1 Modelleerimise tulemuste põhiparameetrite võrdlus

Trafo tüüp	Faasipinge hälve (sü)	Liinipinge hälve (sü)	Faasi aktiivkoormus (sü)	Faasi reaktiivkoormus (sü)	Pingesümmeetria (%)
Ühefaasiline	0,045	0,036	0,75	1,11	2,77
V-ühendusega	0,022	0,026	0,48	0,53	1,77
Scott-ühendusega	0,021	0,020	0,32	0,55	2,05

* tabelis on esitatud maksimaalsed väärtused terve modelleerimise käigust

Avalike elektrivõrkude pingesümmeetria piirväärtused on määratud Eesti standardis [96], mille järgi kehtib üldine nõue, et pingesümmeetria peab olema 95% ajast vähem kui 2% .

Vastavalt modelleerimise tulemustele ühefaasilisel trafol on kõige halvemad kõik tabelis toodud näitajad: kõige suurimad faasi- ja liinipingete hälbed, kõige suurem pingesümmeetria, mis on suurem kui lubatud Eesti standardiga, ning asümmeetriline koormuse jagunemine, kus elektrisüsteemi üks faas on koormatud reaktiivvõimsusega, teine faas on koormatud aktiivvõimsusega ning kolmas faas on üldse koormamata.

Kui vaadelda V- ja Scott-ühendusega trafode tulemusi, siis võrreldes ühefaasilise trafoga, nendes eri tüüpi trafodes on sarnased maksimaalsete hälvete näitajad. Kui võrrelda V- ja Scott-ühenduses trafode tulemusi detailsemalt, siis paistab välja, et V-ühendusega trafol on sõltumatult väljundfaaside koormatusest praktiliselt konstantne pingesümmeetria 1,0 %. Koormuste jagunemine elektrisüsteemi faaside vahel on olemas, aga samal ajal ei ole sümmeetriline nii sümmeetrilise kui ka asümmeetrilise trafo koormuse puhul. Scott-ühendusega trafo puhul tekib lühiajaliselt piirnorme ületav pingesümmeetria. Trafo sümmeetrilise koormuse puhul, elektrisüsteemi pingesümmeetria on nulli lähedane. Samuti trafo sümmeetrilise koormuse korral on jagunevad koormused faaside vahel sümmeetriliselt. Scott-ühendusega trafo asümmeetrilise koormuse tekib elektrisüsteemis suur pingesümmeetria.

Simulatsioonide tulemustest saab järeldada, et juhul kui kontaktvõrgus on tagatud trafo väljundfaaside sümmeetriline koormus, siis on soovitatav paigaldada Scott-ühendusega trafod. Juhul kui kontaktvõrgus ei ole tagatud trafo väljundfaaside sümmeetriline koormus, mida

tavaliselt esineb kiirraudteel, siis on soovitatav paigaldada V-ühendusega trafod. Ühefaasilist trafot võib kasutada väga tugevas elektrisüsteemis, kus elektrirongide koormus on võrreldes elektrisüsteemi koormusega väike ning ei mõjuta süsteemi kvaliteeti. Nõrgas elektrisüsteemis ühefaasilise trafo kasutamine võib kaasa tuua elektrikvaliteedi halvenemise.

5.5. Pinge kõrgemate harmoonikute modelleerimine ning analüüs

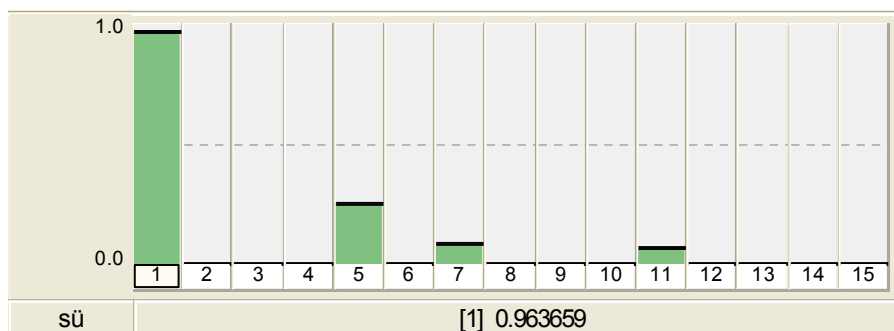
Elektriveduri ajamid koosnevad jõuelektronika muunduritest, mis genereerivad elektrisüsteemi vooluharmoonikuid. Nende sisaldus sõltub muundurite tüübist ning kasutatavatest filtritest. Modelleerimise jaoks vooluharmoonikute sisalduse lähteandmed võetud kirjandusallikatest. Vastavalt allikatele [61], [68], [83], [85], [86], [87], [93], [97] ja [98] on veduri poolt genereeritud vooluharmoonikud paaritud harmoonikud, millest põhilised on (3), 5, (7), 9 ja (11) harmoonik. Sulgudes on antud harmoonikud, mida on vaadeldud üksikutes eelnevalt esitatud kirjandusallikates. Modelleerimiseks genereeritavate vooluharmoonikute lähteandmed on kättesaadavad allikast [68] ja [83]. Käesoleva töö raames kasutatakse lähteandmeid allikast [83], kus on toodud elektrirongi poolt genereeritud vooluharmoonikute arv suhtühikutes veduri nimikoormusel. Lähteandmed on esitatud allpool tabelis 5.2.

Tabel 5.2 Täiskoormusel elektrirongi poolt genereeritud vooluharmoonikud

Harmooniku number	5.	7.	11.
Harmooniku sisaldus, sü	0,3	0,1	0,075

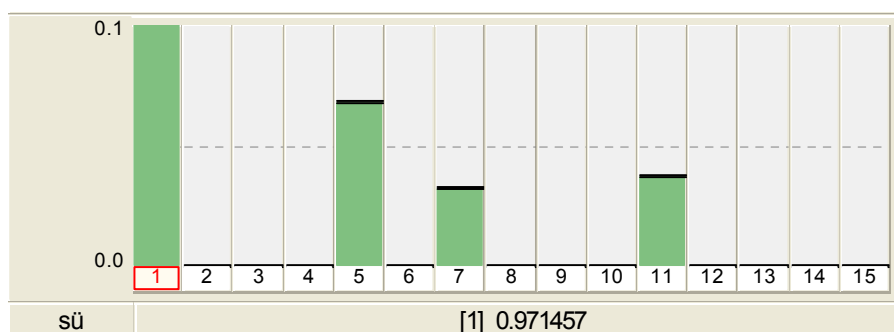
Kuna *PSCAD* tarkvara kasutades ei ole tehniliselt võimalik muuta harmoonikute sisaldust modelleerimise käigus, siis pinge harmoonikute analüüsimisel modelleeritakse rongid nimikoormusel. Vooluharmoonikud on sisestatud kasutades "Current Source" moodulit (vt. peatükk 4.9), kuna on vajalik sisestada ainult ettenähtud harmoonikud erineva amplituudiga. Seega rongi mudeli juures on modelleeritud iga vooluharmooniku sisestus oma vooluallika mooduli kaudu.

Kuna elektrisüsteemis tekivad pingeharmoonikud sõltuvad vealajaamas kasutatava trafo ühendusest, siis viidi simulatsioonid läbi kõigi kolme trafo tüübiga. Kuna V-ühendusega ja Scott-ühendusega trafodel on kaks sekundaarfaasi, siis modelleerimisel on kasutatud igas faasis ühte rongi ning ühefaasilise trafo puhul mõlemad rongid on ühendatud rööpselt. Iga trafo puhul oli mõõdetud pingeharmoonikute sisaldus elektrisüsteemis ning pinge harmooniliste summaarne moonutustegur THD_U . Allpool joonisel 5.20 on näidatud modelleerimise käigus mõõdetud rongide poolt genereeritud vooluharmoonikud, mis vastavad iga trafo puhul tabelis 5.2 toodud lähteandmetele.

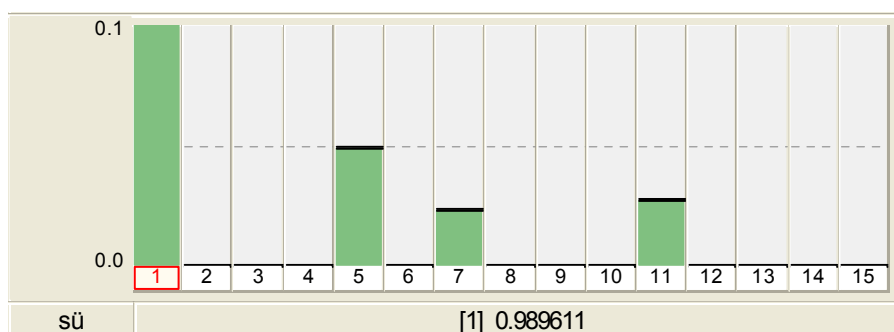


Joonis 5.20 Rongide poolt genereeritud vooluharmonikud veolajaama trafo sekundaarpoolel

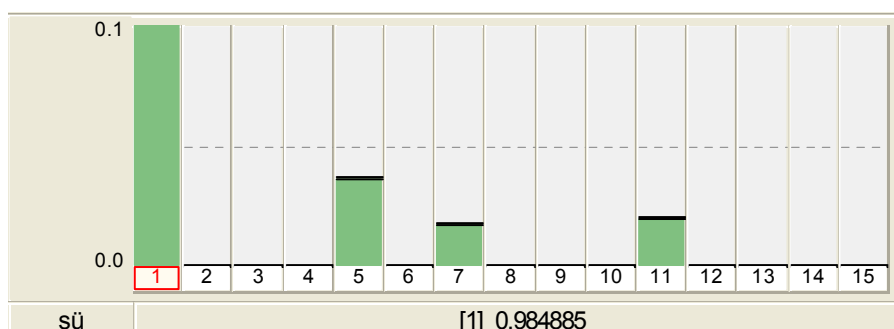
Simulatsioonide käigus saadud pingeharmonikute tulemused on esitatud iga trafo puhul allpool joonistel 5.21 - 5.23 ning kõik tulemused on esitatud allpool koondtabelis (vt. tabel 5.3).



Joonis 5.21 Ühefaasilise trafo puhul elektrisüsteemis tekivad pingeharmonikud



Joonis 5.22 V-ühendusega trafo puhul elektrisüsteemis tekivad pingeharmonikud



Joonis 5.23 Scott-ühendusega trafo puhul elektrisüsteemis tekivad pingeharmonikud

Tabel 5.3 Pinge kõrgemate harmoonikute modelleerimise tulemused, juhul kui mõlemad rongid talitlevad maksimaalkoormusel

Trafo tüüp	5.harmoonik (sü)	7.harmoonik (sü)	11. harmoonik (sü)	THD_U (%)
Ühefaasiline	0,0682	0,0316	0,0369	8,62
V-ühendusega	0,0493	0,0229	0,0268	6,13
Scott-ühendusega	0,0364	0,0168	0,0197	4,54

Vastavalt saadud tulemustele, tekitab kõige rohkem pingeharmoonikuid elektrirongide talitlusel kui kasutatakse veoalajaamas ühefaasilist trafot. Pingeharmoonikute sisaldus elektrivõrgu pingetes on kõige väiksem kui kasutatakse Scott-trafot. Nende kahe juhtumi harmoonikute sisalduse erinevus on peaaegu 50%. V-ühendusega trafo puhul erineb pingeharmoonikute sisaldus elektrisüsteemis ühefaasilisest trafost peaaegu 30%.

Võttes arvesse, et Scott-ühendusega trafo on väga tundlik asümmeetrilise koormusele, siis teostati veel kaks simulatsiooni. Esimesel simulatsiooni puhul vaadeldakse juhtumit, kus üks rong talitleb maksimaalsel koormusel, ning teine rong talitleb poolel koormusel. Teise simulatsiooni korral vaadeldakse juhtumit, kus talitleb ainult üks rong maksimaalsel koormusel. Kuna Scott-ühendusega trafoühenduse esimene ja teine faas ei ole identsed, siis modelleerimisel väljundfaaside koormused vahetatakse omavahel ümber.

Koormuse ja vooluharmoonikute sisaldus ei ole otseselt võrdelised, kuna madalal koormatusel on muunduri kasutegur väiksem ning seega suhteline voolusisaldus suurem, kui täiskoormusel. Kirjandusallikas [83] on toodud 20% koormusel talitleva elektrirongi poolt genereeritud vooluharmoonikute arv suhtühikutes. Selle juhtumi lähteandmed on esitatud allpool tabelis 5.4.

Tabel 5.4 20% koormusel elektrirongi poolt genereeritud vooluharmoonikud

Harmooniku number	5.	7.	11.
Harmooniku sisaldus, sü	0,55	0,3	0,1

Võttes arvesse, et harmoonikute sisaldus on lineaarne sõltuvus, on arvatud vooluharmoonikute sisaldus rongi poole koormuse puhul, mis on esitatud allpool tabelis 5.5.

Tabel 5.5 Poolel koormusel elektrirongi poolt genereeritud vooluharmonoonikud

Harmonooniku number	5.	7.	11.
Harmonooniku sisaldus, sü	0,45	0,225	0,09

Juhtumi tulemused, kus üks rong talitleb maksimaalkoormusel ning teine rong talitleb poolkoormusel on esitatud tabelis 5.6. Juhtumi tulemused, kus talitleb ainult üks rong maksimaalsel koormusel on esitatud tabelis 5.7.

Tabel 5.6 Pinge kõrgemate harmoonikute modelleerimise tulemused, juhul kui üks rong talitleb maksimaalkoormusel ning teine rong talitleb poolel koormusel

Trafo tüüp	5.harmonoonik (sü)	7.harmonoonik (sü)	11. harmonoonik (sü)	THD_U (%)
Ühefaasiline	0,0628	0,0353	0,0312	8,02
V-ühendusega	0,0465	0,0241	0,0243	5,85
Scott-ühendusega (1. faasi koormus - 100%, 2. faasi koormus - 50%)	0,0349	0,0177	0,0184	4,40
Scott-ühendusega (1. faasi koormus - 50%, 2. faasi koormus - 100%)	0,0312	0,0197	0,0145	3,99

Tabel 5.7 Pinge kõrgemate harmoonikute modelleerimise tulemused, juhul kui talitleb ainult üks rong maksimaalkoormusel

Trafo tüüp	5.harmonoonik (sü)	7.harmonoonik (sü)	11. harmonoonik (sü)	THD_U (%)
Ühefaasiline	0,0379	0,0176	0,0206	4,72
V-ühendusega	0,0379	0,0176	0,0206	4,72
Scott-ühendusega (1. faasi koormus - 100%, 2. faasi koormus - 0%)	0,0320	0,0148	0,0174	4,01
Scott-ühendusega (1. faasi koormus - 0%, 2. faasi koormus - 100%)	0,0165	0,0076	0,0089	2,02

Võttes arvesse ülalpool tabelites (vt. tabel 5.3, tabel 5.6 ja tabel 5.7) toodud tulemusi, järeldub, et veoalajaamas kasutatavast trafo tüübist sõltub elektrirongide talitlusest tekkiva pingeharmonoonikute sisaldus elektrisüsteemis. Kõige parema tulemusega on Scott-ühendusega trafo nii sümmeetrilisel kui ka asümmeetrilisel koormustel. Scott-trafo puhul et saavutada parim tulemus on soovituslik asümmeetrilisel koormusel koormata ettemääratud trafo sekundaarfaasi, mille primaarmähised on ühendatud elektrisüsteemi kolme faasidega (vt. joonis 5.2 koormuse

S_{L1} ühendamine Scott-trafo korral). Vastasel juhul Scott-trafo tulemused paremad kui teistel trafodel, kuid väheneb tulemuste erisus väheneb. Halvimat tulemust näitab ühefaasiline trafo, mille puhul pingeharmonikute sisaldus elektrisüsteemis on kaks korda suurem, kui Scott-trafo puhul. V-ühendusega trafo talitleb ainult ühe sekundaarmähise koormamisel nagu tavaline ühefaasiline trafo. Juhul kui mõlemad trafo sekundaarmähised on koormatud, siis võrreldes ühefaasilise trafoga V-ühendusega trafo puhul elektrisüsteemi pingeharmonikute sisaldus on 30% võrra väiksem. Seega sõltumatult koormuse sümmeetrisusest on soovitatav elektrisüsteemi pingeharmonikute vähendamiseks kasutada vealajaamades Scott-ühendusega trafosid.

Kokkuvõte

Tänu ajaloolise elektriraudtee arengule on kujunenud erinevates Euroopa Liidu maades erinevate tehniliste parameetritega elektriraudtee süsteemid, mis ei ole omavahel ühildatavad. Seoses sellega ning sooviga suurendada raudteetranspordi osakaalu reisijate- ja kaubaveol on planeeritud rajada ühine kaasaegne elektriraudtee alates põhja Eestist kuni Poola pealinnani, ja sealt edasi Saksamaa kaudu ühendada ülejäänud mandri Euroopaga. Antud projekti nimetatakse Rail Baltic ning teostatakse Euroopa Liidu finantseerimisega.

Tehniliste tingimuste järgi on kujunenud nii, et kiirraudtee kontaktvõrgus kasutatakse ühefaasilist vahelduvvoolu süsteemi, ning vedurites kasutatakse kolmefaasilisi vahelduvvoolu veomootoreid. Kolmefaasilise mootori ühendamiseks ühefaasilisse kontaktvõrku tuleb esiteks ühefaasiline vahelduvpinge alaldada, ning seejärel muundada kolmefaasiliseks. Tänu jõuelektroonika arengule on see tehniliselt võimalik. Jõuelektroonika kasutamise puuduseks on kõrgemate vooluharmonikute genereerimine elektrisüsteemi.

Elektrivedur on muutuv ühefaasiline koormus, ning seega asümmeetriline koormus elektrisüsteemi jaoks, mis oma talitlusega mõjutab elektrisüsteemi pinget, pingesümmeetriat ja koormuse jagunemist faaside vahel. Seoses sellega enne elektriraudteevõrgu ühendamist elektrisüsteemi tuleb teostada uuringud, mis näitavad elektrirongi talitluse mõju elektrisüsteemile.

Elektrirongi talitluse mõju analüüsimiseks elektrisüsteemile koguti kõikvõimalikest kättesaadavatest kirjandusallikatest materjali veduri koormuskarakteristikute ning modelleerimise kohta, mille põhjal on koostatud üldistatud veduri karakteristik ja elektrirongi mudel *PSCAD* tarkvaras. Koostatud mudel on kergesti käsitletav analüüside teostamiseks ning universaalne. Veduri tehniliste parameetrite muutmisel võimaldab mudel kiiresti teostada korrigeerimisi ning modelleerida vastavalt muudetud parameetritele.

Lõputöös on modelleeritud elektriveduri talitus ideaalsetes tingimustes. Samuti elektriveduri mudel oli ühendatud kolme erineva veoalajaamades laialdaselt kasutatava trafo kaudu ekvivalentse elektrisüsteemiga, eesmärgiga saada iga trafo tüübi jaoks eraldi veduri talitlusest tingitud elektrisüsteemi pingete muutused, koormuste jagunemised elektrisüsteemi faaside vahel ja pingesümmeetriad, ning võrrelda tulemusi. tulemuste analüüsi põhjal on tehtud järeldused veduri talitlusest iga vaadeldud trafo korral.

Eraldi on vaadeldud pingeharmonikute sisaldust elektrisüsteemis, mis tekivad veduri talitlusest kõigi kolme trafo tüübi korral eraldi ning analüüsitud saadud tulemusi.

Antud töö tulemused illustreerivad näitlikult, et vaadeldud elektrisüsteemis on ebaotstarbekas kasutada veoalajaamas ühefaasilisi trafosi. Veoalajaama trafo sekundaarmähiste sümmeetrilise koormuse korral on eelistatumad Scott-ühendusega trafod. Veoalajaama trafo sekundaarmähiste asümmeetrilise koormuse korral tuleb vastavalt konkreetse süsteemi parameetritele vaadelda võimalust kasutada, kas V-ühendusega trafot või Scott-ühendusega trafot. Millise ühendusega trafot kasutada veoalajaamades sõltub riigis kehtivatest elektrikvaliteedi normidest. Trafo valik sõltub suurel määral ka kontaktvõrgu koormuse sümmeetrilisusest ning regeneratiivse pidurdamise kasutamise lubamisest.

Antud töö eesmärgiks oli koostada kirjanduslike allikate põhjal veduri koormuskarakteristikud ja mudelid *PSCAD*-is, ning modelleerimise tulemuste alusel analüüsida veduri talitlusest tingitud mõjusi elektrisüsteemides kolme erinevat tüüpi trafo puhul. Modelleerimise tulemused ning analüüsi järeldused on esitatud viiendas peatükis. Seega lähteülesandes püstitatud ülesanne on edukalt täidetud ning annab aluse veduri talitluse mõju täpsemaks uurimiseks peale kasutusele võetava elektrirongi parameetrite teada saamist.

Kirjandus

- [1] Östlund, S., *Electric Railway Traction*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2012.
- [2] Mike's Railway History. Electric traction. A Vital Development in the History of the Railway. [Online]. <http://mikes.railhistory.railfan.net/r066.html>
- [3] Слепцов М.А., Долаберидзе Г.П., Прокопович А.В., *Основы электрического транспорта*. Москва: Издательский центр "Академия", 2006.
- [4] Siemens AG. May 16, 1881 – Inauguration of the first electric streetcar in the world. [Online]. http://www.siemens.com/history/en/news/1075_electrical-streetcar.htm
- [5] Heritage History. Edison's Electric Railway. [Online]. <http://www.heritage-history.com/?c=read&author=meadowcroft&book=edison&story=railway>
- [6] Irish Railway Record Society. The Giant's Causeway and The Bessbrook & Newry Tramways. [Online]. <http://www.irrs.ie/Journal%20177/177%20GiantsCauseway.htm>
- [7] Bruce, A., Senior, J. Trolleybus history - current collector design. [Online]. <http://www.trolleybus.co.uk/history1.htm>
- [8] Siemens AG. Electrifying Trains. [Online]. http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_spring_2004/electric_trains_article.htm
- [9] Duffy, M.C., *Electric Railways 1880-1990*, 1st ed. United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2003.
- [10] Tehnikamaailm. Lendlev rong. [Online]. <http://www.tehnikamaailm.ee/lendlev-rong/>
- [11] Shanghai Maglev Transportation Development. Principle of Magnetic Levitation. [Online]. <http://www.smtdc.com/en/gycf3.html>
- [12] Bellis, M. Chapter 1: Background What is MAGLEV?. [Online]. <http://inventors.about.com/library/inventors/blrailroad3.htm>
- [13] Michaels, J. LaGrange Park students attracted to maglev train project. [Online]. <http://lagrange.suntimes.com/news/maglev-LAG-02072014:article>

- [14] Lindsey Online Services, LLC. High Speed Rail. [Online]. http://www.1001-home-efficiency-tips.com/high_speed_rail.html
- [15] Steimel, A., *Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience*. Munich: Oldenbourg Industieverlag, 2008.
- [16] Kable Intelligence Limited. (2013, August) Top ten fastest trains in the world. [Online]. <http://www.railway-technology.com/features/feature-top-ten-fastest-trains-in-the-world/>
- [17] Planet Apex. Fastest Train in the World - China's CRH380A. [Online]. <http://planetapex.blogspot.com/2013/03/fastest-train-in-world-chinas-crh380a.html>
- [18] Bloomberg. (2013, August) 581 km/h: Japan tests world's fastest train. [Online]. <http://www.smh.com.au/travel/travel-news/581-kmh-japan-tests-worlds-fastest-train-20130829-2sshp.html>
- [19] Guinness World Records Limited. Fastest Maglev train. [Online]. <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/11000/fastest-maglev-train>
- [20] Cable News Network. (2010 , December) Shanghai-Beijing train breaks world speed record. [Online]. <http://travel.cnn.com/shanghai/life/shanghai-beijing-trains-breaks-world-speed-record-796974>
- [21] 4rail.net Railroad Reference. Super High Speed Records Page. [Online]. http://www.4rail.net/ref_fast_records.php
- [22] Wikipedia. TGV World Speed Record 574 km per hour. [Online]. http://en.wikipedia.org/wiki/File:TGV_World_Speed_Record_574_km_per_hour.jpg
- [23] Kable Intelligence Limited. Industry Projects - View By Region. [Online]. <http://www.railway-technology.com/projects/region/>
- [24] Bükker, T. Maps and facts on European interoperability issues. [Online]. http://www.bueker.net/trainspotting/voltage_map_europe.php#1
- [25] Wikipedia. (2014, April) Europe rail electrification en. [Online]. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Europe_rail_electrification_en.svg
- [26] European Commission Directorate-General Regional Policy, "Feasibility study on Rail Baltica railways," January 2007. [Online]. http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/evaluation/railbaltica/annex.PDF

- [27] European Tribune. From Universal to Modular. [Online]. <http://www.eurotrib.com/story/2009/6/21/8330/41649>
- [28] Railway Technical Web Pages. Electronic Power for Trains. [Online]. <http://www.railway-technical.com/tract-02.shtml>
- [29] International Union of Railways. General definitions of highspeed. [Online]. <http://www.uic.org/spip.php?article2016>
- [30] Revolve Magazine. (2012, March) Europe at 250 km per hour. [Online]. <http://www.revolve-magazine.com/home/2012/03/05/europe-train-transport/>
- [31] Rail Baltica. Project description. [Online]. <http://www.rail-baltica.com/pub/>
- [32] Estonian World. Rail Baltic to connect the capitals of Estonia, Latvia and Lithuania with a high-speed railroad. [Online]. <http://estonianworld.com/business/rail-baltic-eu-transport-plans-hope-pick-speed/>
- [33] Euroopa Komisjon Regionaalpoliitika Peadirektoaat, "Rail Baltica raudtee teostatavusuuring. Peamised järeldused ja soovitused," Jaanuar 2007. [Online]. http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/evaluation/railbaltica/concl_et.PDF
- [34] Rail Baltic. Rail Balticu planeerimise ajakava täpsustus. [Online]. <http://www.railbaltic.info/et/uudised/8-uudised/138-rail-balticu-planeerimise-ajakava-taepsustus>
- [35] Калинин В. К., *Электровозы и электропоезда*. Москва: Транспорт, 1991.
- [36] Уральская Железнодорожная Компания. (2014) Классификация тягового подвижного состава. [Online]. <http://rail.uzdk.ru/transport/klassifikaciya-tyagovogo-podvizhnogo-sostava-znaki-nanosimye-na-naruzhnyh-bokovyh-stenkah-lokomotivov>
- [37] Феоктистов, В.П., Рябцев, Г.Г., Просви́ров, Ю.Е., Пупынин, В.Н., Рыбников, Е.К., Володин, С.В., Иванов, В.В., *Электрические железные дороги*, В.П., Просви́ров, Ю.Е. Феоктистов, Ed. Москва, Самара: СамГАПС, 2006.
- [38] Дубровский, З., Попов, В., Тушканов., Б., *Грузовые электровозы переменного тока: Справочник*. Москва: Транспорт, 1991.
- [39] А.И. Тищенко, Ed., *Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам*. Москва: Транспорт, 1976, vol. 1.

- [40] Railway Technical Web Pages. High Speed Train Links Page. [Online]. <http://www.railway-technical.com/hst-01.shtml>
- [41] Köhler, T.B. InterCityExpress (ICE)/InterCity-NeiTech (ICT). [Online]. <http://www.railfaneurope.net/ice/ice.html>
- [42] Railway Technical. Electric Traction Power Supplies. [Online]. <http://www.railway-technical.com/etracp.shtml>
- [43] Encyclopædia Britannica, Inc. Types of traction systems. [Online]. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/345886/locomotive/64098/Types-of-traction-systems>
- [44] Laugis, J., Lehtla, T., Joller, J., Rosin, A., Vinnikov, D., Lehtla, M., *Kergrööbassõidukite ajamid ja juhtimine*. Tallinn: TTU, Elektriamite ja jõuelektronika instituut, 2008. [Online]. <http://egdk.ttu.ee/files/documents/elektriamid-raamat/>
- [45] Zhang, W., Zhou, N., Li, R., Mei, G., Song, D., "Pantograph and catenary system with double pantographs for high-speed trains at 350 km/h or higher," *Journal of Modern Transportation*, vol. 19, no. 1, pp. 7-11, March 2011.
- [46] Ambrósio, J., Pombo, J., Pereira, M., "Optimization of high-speed railway pantographs for improving," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 3, January 2013.
- [47] TTÜ, elektriamite ja jõuelektronika instituut, *Õppeaine AAR0120 Elektertransport / Electric vehicles loengumaterjalid.*, 2010.
- [48] Railway Technical Web Pages. Electric Traction Drives. [Online]. <http://www.railway-technical.com/drives.shtml>
- [49] Australian Government Department of Industry. (2014) AC traction. [Online]. <https://eex.govspace.gov.au/resource/potential-energy-efficiency-opportunities-in-the-australian-road-and-rail-sectors/ac-traction/>
- [50] ABB. (2011) ABB traction motors Reference list. [Online]. [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/773cafefdd83f72ec12579810025b514/\\$file/ABB%20reference%20list%20Low.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/773cafefdd83f72ec12579810025b514/$file/ABB%20reference%20list%20Low.pdf)
- [51] Railway Technical Web Pages. Direct Current Motor Control. [Online]. <http://www.railway-technical.com/tract-01.shtml#balancingspeed>

- [52] Energy Efficiency Technologies for Railways. (2002, October) IGBT. [Online]. http://www.railway-energy.org/static/IGBT_28.php
- [53] Railway Technical Web Pages. Electric Locomotive Glossary. [Online]. <http://www.railway-technical.com/elec-loco-bloc.shtml>
- [54] Lehta, M., "Elektertranspordi areng," TTÜ, Elektritehnika instituut, Loengumaterjal 2014. [Online]. http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR0120/1-elektertranspordi_areng.pdf
- [55] Railway Technical Web Pages. Wheel Arrangements. [Online]. <http://www.railway-technical.com/whlarr.shtml>
- [56] Быстрицкий, X., Дубровский, З., Ребрик, Б., *Устройство и работа электровозов переменного тока: Учебник для технических школ ж.-д. транспорта*, 4th ed. Москва: Транспорт, 1982.
- [57] Lehtla, M., "Sõiduki liikumisvõrrandid ja võimsusbilanss," TTÜ, Elektriainite ja jõuelektronika instituut, 2011.
- [58] Baker, C.J., Brockie, N.J., "Wind tunnel tests to obtain train aerodynamic coefficients," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, no. 38, pp. 23-28, 1991.
- [59] Дубровский, З., Курчатова, В., Томфельд, Л., *Электровоз. Управление и обслуживание*. Москва: Транспорт, 1979.
- [60] Chen, C.S., Chuang, H.J., Fan, L.J., "Design of Main Transformer Capacity for Electrified Railway Power Systems," in *International Conference on Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000.*, vol. 1, Perth, WA, Australia, 4-7 December 2000, pp. 311 - 316 vol.1.
- [61] Bing Ai, Bo Jiang, "Transient control simulation of AC drive locomotive network side converter system," in *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, Yichang, 2011, pp. 916 - 919.
- [62] Lehtla, T., Joller, J., Lehtla, M., Laugis, J., "Parameter identification and comparison of an induction motor models," in *Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. (IEE Conf. Publ. No. 475)*, London, 2000, pp. 201 - 205.
- [63] Voldek, A., *Elektrimasinad II*. Tallinn: Valgus, 1973.

- [64] Castelli-Dezza, F., Maglio, M.M., Marchegiani, G., Ortega, D.F., "Reduction of motor overvoltage fed by PWM AC drives using a universal model," in *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Rome, 2010, pp. 1 - 6.
- [65] Amin, A.M.A, "Power factor improvement of AC chopper-based induction motor drive," in *The 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 2, San Jose, CA, 1999, pp. 915 - 920.
- [66] Zhiwen, M., Zheng, T., Fei, L., "Research on reciprocal power-fed AC drive test rig for electric traction applications," in *Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS.*, vol. 3, Nanjing, 2005, pp. 1873 - 1876.
- [67] Hussein, A., Joos, G., "Modeling and simulation of traveling waves in induction motor drives," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC*, vol. 1, Atlanta, GA, 1997, pp. 128 - 134.
- [68] Smith, A.C., Healey, R.C., Williamson, S., "A transient induction motor model including saturation and deep bar effect," *Transactions on Energy Conversion, IEEE*, vol. 11, no. 1, pp. 8 - 15, Mar 1996.
- [69] Carrubba, A., Di Piazza, M.C., Tine, G., Vitale, G., "Evaluation of Common Mode Disturbance Mitigation Devices in AC Motor Drives through HF Modelling," in *International Symposium on Industrial Electronics, IEEE*, vol. 3, Montreal, Que, 2006, pp. 2315 - 2320.
- [70] Jia, K., Bohlin, G., Enohnyaket, M., Thottappillil, R., "Modelling an AC motor with high accuracy in a wide frequency range," *Electric Power Applications, IET*, vol. 7, no. 2, pp. 116 - 122, Feb. 2013.
- [71] Maki-Ontto, P., Kinnunen, H., Luomi, J., "Three-Phase Model for the Circuit Simulation of Common-Mode Phenomena and Shaft Voltages in AC Motor Drive Systems," in *International Conference on Electric Machines and Drives, IEEE*, San Antonio, TX, 2005, pp. 437 - 443.
- [72] Ogasawara, S., Akagi, H., "Modeling and damping of high-frequency leakage currents in PWM inverter-fed AC motor drive systems," *Transactions on Industry Applications, IEEE*, vol. 32, no. 5, pp. 1105 - 1114, Sep/Oct 1996.
- [73] Grandi, G., Casadei, D., Reggiani, U., "Analysis of common- and differential-mode HF

- current components in PWM inverter-fed AC motors," in *Power Electronics Specialists Conference, PESC*, vol. 2, Fukuoka, 1998, pp. 146 - 1151.
- [74] Zach, F. C., Ertl, H., "Efficiency Optimal Control for AC Drives with PWM Inverters," *Transactions on Industry Applications, IEEE*, vol. IA-21, no. 4, pp. 987 - 1000, July 1985.
- [75] Lawler, J.S., Bailey, J., McKeever, J., "Minimum current magnitude control of surface PM synchronous machines during constant power operation," *Power Electronics Letters, IEEE*, vol. 3, no. 2, pp. 53 - 56, June 2005.
- [76] Dixon, J.W., Kulkarni, A.B., Nishimoto, M., Ooi, B., "Characteristics of a Controlled-Current PWM Rectifier-Inverter Link," *Transactions on Industry Applications, IEEE*, vol. IA-23, no. 6, pp. 1022 - 1028, Nov 1987.
- [77] Jacobina, C.B., Freitas, I.S., Azevedo, L.G., Correa, M.B.R., "AC-AC drive systems with open-end five-phase machine and sixteen-leg dc-link converter," in *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Gramado, 2013, pp. 921 - 928.
- [78] Bowes, S.R., Clare, J.C., "Computer-aided design of PWM power-electronic variable-speed drives," *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, vol. 135, no. 5, pp. 240 - 260, September 1988.
- [79] Cao, R., Collins, E.R., "The effects of load types on the behavior of AC motor drives during voltage sags," in *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 1, 2002, pp. 353 - 358.
- [80] Shenoy, J.U., Sheshadri, K.G., Parthasarathy, K., Khincha, H.P., Thukaram, D. , "MATLAB/PSB Based Modeling and Simulation of 25 kV AC Railway Traction System - a Particular Reference to Loading and Fault Conditions," in *IEEE Region 10 Conference TENCN 2004*, vol. 3, Chiang Mai, Thailand, 21-24 November 2004 , pp. 508 - 511 Vol. 3.
- [81] Binkowski, T., Grad, M., Latka, M., Malska, W., "A drive system with high-speed single-phase supplied three-phase induction motor," in *13th Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC.*, Poznan, 2008, pp. 714 - 717.
- [82] Hoseini, S.K., Adabi, J., Sheikholeslami, A., Nami, A., "Current controlled-based modulation strategies for common-mode voltage mitigation in PWM inverters-fed AC motor drive systems," in *15th International Power Electronics and Motion Control*

Conference (EPE/PEMC), Novi Sad, 2012, pp. DS3c.7-1 - DS3c.7-8.

- [83] Singh, B., Bhuvaneswari, G., Garg, V., Gairola, S., "Pulse multiplication in AC-DC converters for harmonic mitigation in vector-controlled induction motor drives," *Transactions on Energy Conversion, IEEE*, vol. 21, no. 2, pp. 342 - 352, June 2006.
- [84] Balazs, G.G., Horvath, M., Schmidt, I., Kiss, P., "Examination of New Current Control Methods for Modern PWM Controlled AC Electric Locomotives," in *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD 2012*, Bristol, UK, 27-29 March 2012 , pp. 1-5.
- [85] Tan, P.S., Holmes, D.G., Morrison, R.E., "Control of active filter in 25kv ac traction systems," Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University, Australia,. [Online]. <http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec00/tan00.pdf>
- [86] Tan, P.C. ; Morrison, R.E. ; Holmes, D.G., "Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in a 25 kV Electrified Railway System Using a Shunt Active Filter Based on Voltage Detection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 575 - 581, April 2003.
- [87] Tan P.C., Loh P.C., Holmes, D.G., "Optimal impedance termination of 25-kV electrified railway systems for improved power quality," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1703-1710, April 2005.
- [88] Kulworawanichpong, T, "Optimising AC Electric Railway Power Flows with Power Electronic Control," Electronic, Electrical and Computer Engineering, University of Birmingham, PhD Thesis 2003. [Online]. <http://etheses.bham.ac.uk/4/1/Kulworawanichpong04PhD.pdf>
- [89] Battistelli, L., Pagano, M., Proto, D., Amendola, A., Candurro, L., Pignotti, A., "Short Circuit Modelling and Simulation of 2×25 kV High Speed Railways," in *Second Asia International Conference on Modeling & Simulation, 2008. AICMS 08*, Kuala Lumpur, Malaysia, 13-15 May 2008, pp. 702-707.
- [90] Dolara, A., Gualdoni, M., Leva, S., "EMC Disturbances on Track Circuits in the 2×25kV High Speed AC Railways Systems," in *IEEE Trondheim PowerTech, 2011*, Trondheim, Norway, 19-23 June 2011, pp. 1-9.
- [91] Guo,W., Mingxing, T., Enen, R., "Identification of Hybrid Active Compensation Topology

- for Electrified Railway Load," in *International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008.*, Wuhan, China, 17-20 October 2008, pp. 2092 - 2095.
- [92] Bocharnikov, Y.V., Tobias, A.M., Roberts, C., Hillmansen, S., Goodman, C.J., "Optimal Driving Strategy for Traction Energy Saving on DC Suburban Railways," *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 5, pp. 675-682, September 2007.
- [93] Morrison, R.E., Clark, A.D., "Probabilistic Representation of Harmonic Currents in AC Traction Systems," *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, vol. 131, no. 5, pp. 181-189, September 1984.
- [94] Ho, T.K., Chi, Y.L., Wang, J., Leung, K.K., Siu, L.K., Tse, C.T., "Probabilistic Load Flow in AC Electrified Railways," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 152, no. 4, pp. 1003-1013, July 2005.
- [95] Golovanov, N., Lazaroiu, G.C., Roscia, M., Zaninelli, D., "Voltage unbalance vulnerability areas in power systems supplying high speed railway," in *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*, vol. 3, 2005, pp. 2509 - 2514.
- [96] Eesti Standardikeskus, *EVS-EN 50160:2010. Avalike elektrivõrkude pingetunnussuurused.*: EVS, 2010.
- [97] Ruomei, Li, "A high power active filter for harmonic compensation in an electric locomotive," in *International Conference on Power System Technology*, vol. 2, 2002, pp. 1059 - 1063.
- [98] Shaobing, Y., Mingli, W., "Dynamic load modelling of electric locomotive for power quality assessment of utilities," in *Conference on Railway Traction Systems, IET*, IET, 2010, pp. 1 - 5.

L.1. Pidurdamise mudeli aktiivtakistuse andmefail

0.00	9.0E+09
8.77	9.0E+09
8.78	7.5E+03
8.79	3.7E+03
8.80	2.5E+03
8.90	5.6E+02
9.00	3.2E+02
9.10	2.2E+02
9.20	1.7E+02
9.30	1.4E+02
9.40	1.2E+02
9.50	1.0E+02
9.60	1.1E+02
9.70	1.3E+02
9.80	1.5E+02
9.90	1.8E+02
10.00	2.3E+02
10.10	3.0E+02
10.20	4.5E+02
10.30	9.0E+02
10.31	1.0E+03
10.32	1.1E+03
10.33	1.3E+03
10.34	1.5E+03
10.35	1.8E+03
10.36	2.3E+03
10.37	3.0E+03
10.38	4.5E+03
10.39	9.0E+03
10.40	9.0E+09
21.00	9.0E+09

L.2. PSCAD-i mudel kahe rongi talitluse mõju analüüsimisel

