



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Energiatõhususe hindamise ja energiasalvestite arvutuse meetoodika linna elektertranspordile

HARDI HÕIMOJA

TALLINN 2009

ENERGEETIKA. ELEKTROTEHNIKA. MÄENDUS D42

**Energiatõhususe hindamise ja
energiasalvestite arvutuse meetoodika
linna elektertranspordile**

HARDI HÕIMOJA

TTÜ
KIRJASTUS

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Energeetikateaduskond
Elektrijamite ja jõuelektronika instituut

Väitekirj on lubatud kaitsmisele energeetikateaduskonna dekaani 19.11.2009 korraldusega filosoofiadoktori kraadi väitekirja energia- ja geotehnika alal

Juhendaja

Professor Dr. Sc. techn. Juhan Laugis,
Tallinna Tehnikaülikool

Oponendid

Professor Dr. habil. Sc. ing. Leonids Ribickis,
Läti Teaduste Akadeemia täisliige, Riia Tehnikaülikooli tööstuselektronika ja elektrotehnika instituudi direktor

Professor Dr. habil. Algirdas Smilgevičius,
Vilniuse Gediminase Tehnikaülikool

Tehnikakandidaat Tõnu Pukspuu,
OÜ SystemTest

Väitekirja kaitsmine

18. detsember 2009. a. kell 10.00
Ruum VII-430
Tallinna Tehnikaülikool, Ehitajate tee 5, Tallinn

Deklaratsioon Eklareerin, et käesolev doktoritöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli doktorikraadi taotlemiseks ja selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

/Hardi Hõimoja/

Autoriõigus: Hardi Hõimoja, 2009

ISSN"3628/696Z

ISBN"; 9: /; ; : 7/7; /; 82/2

SISUKORD

Sissejuhatus	8
Tehniline taust	8
Teema aktuaalsus	9
Uurimistöö põhieesmärk ja -ülesanded.....	9
Kasutatud uurimismeetodid ja -vahendid.....	10
Teaduslik uudsus.....	10
Töö praktiline väärtus	10
Aprobatsioon	11
Lühendid.....	12
Sümbolid	13
1 Tehnika tase.....	14
1.1 Tallinna elektertranspordivõrgu üldiseloomustus.....	14
1.2 Energiamuundusprotsessid keskpingevõrgu ja sõiduki vahel.....	14
1.3 Elektertranspordisüsteemi vealajaamad.....	17
1.3.1 Võimalik energiasääst alaldi topoloogia valikuga.....	18
1.3.2 Energiasääst pidurdusenergia tagastamisega keskpingevõrku.....	20
1.3.3 Energiasääst salvestiga vealajaamas	23
1.4 Energiasäästu võimalused veoenergia jaotamisel.....	25
1.4.1 Veovõrkude struktuurid.....	25
1.4.2 Kontaktliinide üldiseloomustus.....	25
1.4.3 Kaod kontaktliinides	27
1.4.4 Kadude vähendamine koormuse jaotamisega mitme vealajaama vahel	27
1.4.5 Pingelangude vähendamine ja pidurdusenergia taaskasutus salvestusalajaamade abil.....	28
1.4.6 Energiasääst üleminekuga kõrgemale pingeniivoole	30
1.5 Veeremi arengutase ja kasutatavad energiasäästumeetodid.....	31
1.5.1 Tallinna elekterveeremi üldiseloomustus.....	32
1.5.2 Energiatõhususe parandamine pardapealsete salvestitega	33
1.5.3 Energiasääst ökonoomse sõidustiili valikuga.....	35
1.5.4 Energiasääst liikluse reaalaja juhtimissüsteemide kasutamisega	37
1.6 Elektertranspordisüsteemi energiasäästuvõimaluste kokkuvõte.....	38
2 Energiasalvestite liigitus ja analüüs.....	39
2.1 Liigitus ja põhiparameetrid	39
2.1.1 Salvesti energiabilanss	40
2.1.2 Laetus- ja tühjenemisaste	41
2.1.3 Elektertranspordi salvestitele esitatavad nõuded.....	41
2.2 Elektrokeemiline energiasalvestus.....	42
2.2.1 Pliiakud	42
2.2.2 Nikkel-kaadmiumakud	43
2.2.3 Nikkel-metallhüdriidakud	43
2.2.4 Liitium-ioonakud.....	43

2.2.5	Liitium-polümeerakud.....	44
2.3	Elektrilised ja mehaanilised energiasalvestid	44
2.3.1	Ülikondensaatorid	44
2.3.2	Hoorattad.....	46
2.4	Energiasalvede võrdlev analüüs.....	49
3	Energiasalvestite topoloogiad, mudelid ja juhtimine	51
3.1	Salvesti liideste üldstruktuur ja ülesanded.....	51
3.2	Aku- ja ülikondensaatorpatareide jõuliidesed.....	53
3.2.1	Vahetult energiasalvestile ühendatav langetus-tõstemuundur.....	53
3.2.2	Vahelduvvoolu vahelülige ülikondensaatorsalvesti	54
3.2.3	Energiasalvesti, salvesti ja koormuse rööpühendus	55
3.2.4	Energiasalvesti, salvesti ja koormuse kaskaadühendus.....	56
3.3	Hooratassalvesti jõuliides	57
3.4	Energiasalvestite mudelid.....	59
3.4.1	Ülikondensaatorpatareid mudel.....	59
3.4.2	Aku mudel.....	61
3.4.3	Hooratass mudel.....	62
3.5	Salvestite energiavahetuse juhtimine.....	62
3.5.1	Energiavahetuse seisundid	62
3.5.2	Salvesti laadimis- ja tühjenemisvõime hindamine	63
3.5.3	Võimsuse puudu- ja ülejäägi tuvastamine.....	64
3.5.4	Energiasalvesti üldistatud juhtimiseeskiri.....	65
4	Energiatöötamise analüüsi ja salvesti arvutusmeetodika.....	66
4.1	Analüüsitud üldvalimite kirjeldus.....	66
4.2	Koormusvõimsuste ja toitepingete jaotumise analüüs	67
4.2.1	Võimsuse histogrammid.....	67
4.2.2	Pinge histogrammid	69
4.3	Koormuse ja kontaktliini pingest statistiline hindamisviis.....	71
4.4	Salvesti arvutusviisid madalpääsfiltri analoogia alusel.....	71
4.5	Salvesti parameetrite arvutusviisid	72
4.5.1	Salvesti parameetrite arvutamine toitevõimsuse silumiseks	72
4.5.2	Kontaktliini pingest stabiliseeriva salvesti arvutusviisid	74
4.5.3	Pidurdusenergia salvesti arvutusviisid	75
4.5.4	Salvesti arvutusviisid kontaktliinivabal liikumisel.....	76
4.6	Arvutusviisid rakendusnäited.....	76
4.6.1	Liini koormuse ühtlustamine.....	76
4.6.2	Kontaktliini pingest stabiliseerimine	80
4.6.3	Pidurdusenergia taaskasutamine	83
4.6.4	Sõiduki kontaktliinivaba liikumine	84
4.6.5	Arvutatud salvesti parameetrite kokkuvõttev tabel.....	85
4.7	Ülikondensaatorsalvesti dimensioneerimine.....	86
4.8	Energiasalvesti majandusliku tasuvuse arvutus	87
4.8.1	Energiasalvesti tasuvusaeg sõiduki pardal	88
4.8.2	Veolajaama statsionaarse energiasalvesti tasuvusaeg.....	89

4.9	Kasutatud arvutusmetoodika SWOT analüüs	89
5	Energiasalvesti topoloogiad ja arvutusmeetodid väikepingelistele abiahelatele	90
5.1	Kergrööbassoiduki väikepingeliste ahelate kirjeldus.....	90
5.2	Varutoiteallikas	90
5.3	Koostoimeline väikepingeline salvesti.....	91
5.3.1	Väikepingeliste ahelate koormusvoolude analüüs	91
5.4	Rööpapiduri efektiivsuse tõstmise meetod	92
5.4.1	Rööpapiduri tööpõhimõte.....	92
5.4.2	Aku- ja ülikondensaatorpatarei ühendusviisid	93
5.4.3	Rööpapiduri koostoimelise varutoiteallika näide	94
5.4.4	Rööpapiduri koostoimelise energiasalvesti arvutusmeetod	96
5.4.5	Ülikondensaatormoodulite valikumudel	96
5.4.6	Simulatsioonid ja nende tulemuste analüüs	97
6	Energiatõhusa elekterveo kontseptsiooni edasiarendusvõimalused	101
6.1	Energiasääst diiselektrilistes ajamites	101
6.2	Energiasalvesti koostoime kütuseelementidega.....	104
	Järeldused ja soovitusel.....	105
	Viidatud kirjanduse loetelu.....	107
	Authori publikatsioonid	117
	Kokkuvõte	119
	Abstract.....	120
	Elulookirjeldus	121
	Curriculum Vitae	123

Sissejuhatus

Tehniline taust

Tänapäeva energeetika üheks põhiprobleemiks on energiatarbimise ebäühtlus, kuna lühiajaliste koormustippude tõttu tuleb terve tootmise ja jaotamise infrastruktuur üle dimensioneerida. Enamuse ajast töötavad tipukoormust põhjustavad paigaldised alakoormusel, mida tuleb pidada majanduslikus mõttes vastuvõetamatuks.

Koormuse ühtlustamise põhimõtte puhvrite ehk vahesalvestite kasutamisega on ammutuntud, kuid raskesti realiseeritav, seda eriti suurte võimsuste ja energiahulkade juures. Ühtlustamise ja puhverdamise probleemid tulevad elektertranspordis teravamalt esile kui üldenergeetikas. Võimsus püsitalitluses moodustab alla 10 % maksimumvõimsusest, mida sõidukid tarbivad kiirendamisel. Rekuperatiivpidurdusel vabanev energia tuleb juhul, kui võrk ei suuda seda vastu võtta, hajutada pidurdustakistitel soojusena, vastuvõtuvõimeline võrk või õigesti dimensioneeritud energiasalvesti lubavad pidurdusenergia taaskasutamiseega vähendada kulutusi võrgust tarbitavale elektrienergiale.

Traditsiooniliselt leiavad elektrienergia salvestamisel kasutatud elektrokeemilised akumulaatorid, mille peamiseks puudusteks on väike erivõimsus ja suhteliselt lühike tööiga. Tuleb mainida, et viimastel aastakümnetel toimunud arengud akude täiustamise vallas on toonud kaasa nii erivõimsuse, erienergia kui ka töötüklite arvu kasvu, kuid nende tehnoloogiline küpsus ja hinnatase muudavad need praeguse tehnika taseme juures elektertranspordi rakendustel ebaatraktiivseteks.

Elektrokeemilistele akudele pakuvad tänapäeval tõsist konkurentsi alternatiivsed salvestusmeetodid, millest elektertranspordi puhul on ennast õigustanud kaksikkiht- ehk ülikondensaatorid ja hoorattad. Suutmata oma erienergiaga võistelda akudega, on need tänu tunduvalt suuremale erivõimsusele sobilikud lahendama eelkirjeldatud energiatarbimise ühtlustamise ja pidurdusenergia salvestamise ülesandeid.

Mainitud kaks salvestusviisi on juba leidnud laialdast kasutamist välisriikides, kus senine kogemus räägib nende positiivsest mõjust energiatõhususele: koormustippude silumisel kahanevad kaod kontaktliinides, paraneb pinge kvaliteet ja väheneb veolajaamade energiatarbimine. Väitekirjas analüüsitud salvestite võimalik mõju Tallinna elektertranspordi energiatarbimise näitajatele lubab oletada, et nende kasutamine omab majanduslikku efekti ka kodumaal.

Energiasalvestiga komplekteeritud sõidukid võivad teatud vahemaid läbida kontaktliinist sõltumatult, mistõttu võib näiteks olemasolevaid trolliliine pikendada ilma kulutusteta täiendavale infrastruktuurile. Teatud lõikudes võib olemasoleva kontaktliini demonteerida parandamiseks visuaalset linnapilti ning võimaldamaks suuregabariidiliste veoste liikumist.

Energiasalvestite kasutuselevõtt pole ainus elektertranspordi energiatõhususe parendamise meetod. Oma põhilise eesmärgi – reisijatele kvaliteetse transporditeenuse tagamise – saavutamine väiksema energiakuluga on võimalik ka muude tehniliste ja organisatoorsete meetmete rakendamisega. Siia loetelusse kuuluvad reguleeritava pingega ja energia tagastusvõimega veolajaamad,

kontaktliini lõikude koormuse jaotamine veoalajaamade vahel, liikluse reaalaja juhtimissüsteemid ja ökonoomse sõidustiili võtted. Parimad tulemused energiasäästliku elektertranspordi kavandamisel saavutatakse tehniliste ja organisatoorsete meetmete koostoimega, mis lubab maksimaalselt ära kasutada mõlema potentsiaali.

Kuigi väitekirjas on käsitletud kontaktliiniga seotud elektertransporti, on saadud tulemused ning järeldused kohandatavad ka hübriidsõidukitele ja sõidukitele, mis liiguvad ainult energiasalvestis akumuleeritud energia arvel.

Teema aktuaalsus

Elektertranspordi eelisarendugut käsitlevad raamdokumendid

Elektertranspordi eelisarendamine on seatud prioriteediks paljudes ühistranspordi arengut puudutavates raamdokumentides mitte ainult Eestis, vaid ka välismaal [CIV03] [TAK06] [ÜTA06]. Osana säästva ja jätkusuutliku energeetika üldprobleemidest on energiatõhusa elektertranspordi temaatika leidnud kajastamist nii Euroopa Liidu nn ökodisaini direktiivis 2005/32/EÜ [EUR05] kui ka Eesti Energiatehnoloogia Programmis [ENE08].

Uurimis- ja arendustegevuse järjepidevus

Teine asjaolu, mis näitab väitekirjas hõlmatud teemade olulisust, seisneb varasemate, energiasäästlikku elektertransporti käsitlevate uurimistööde jätkamises. Teadmiste pideva kasvu ja tehnika arengu juures peab elektertranspordialane uurimis- ja arendustöö toimima katkematu protsessina, kus iga eelnev väitekirja on aluseks järgmise koostamisele. Nagu näitab tehnika taseme analüüs, vajab Tallinna elektertranspordisüsteem mitmeski mõttes kaasajastamist, mida saab efektiivselt läbi viia vaid koostöös teadusasutustega.

Eestikeelse teadusliku insenerimõtlemise jätkusuutlikkus

Kolmandaks, käesoleva väitekirja näol on tegemist esmakordse eestikeelse elektersõidukite energiatõhusust ja energiasalvesteid käsitleva uurimusega, mille käigus tuli korrastada terminoloogilist baasi ja leida seni puuduvad vasted võrkeelsele teadussõnavarale.

Uurimistöö põhieesmärk ja -ülesanded

Väitekirja koostamise raames läbi viidud uurimuste peamiseks eesmärgiks oli kindlaks teha kontaktliiniga seotud elektertranspordi energiatõhususe hetkeseis ja selle parendamise võimalused energiasalvestite kasutuselevõtuga Tallinna elektersõidukipargi ja seda teenindava infrastruktuuri näitel. Soovitud tulemuseni jõudmiseks tuli lahendada alljärgnevad ülesanded:

1. Tallinna elektertranspordisüsteemi üldise tehnilise taseme, sh energiatõhususe hindamine võrreldes muu maailmaga, hõlmates nii energia muundamist, jaotamist, tarbimist kui ka salvestamist, ning esialgsete järelduste tegemine optimeerimisvõimaluste kohta.

2. Energiasalvestuse võimaluste hindamine linnasisese elektertranspordi energiatõhususe parandamise seisukohalt.
3. Aegridade statistilisel analüüsil põhineva arvutusmetoodika väljatöötamine konkreetsele sõidukitüübile sobiva energiasalvesti parameetrite leidmiseks lähtuvalt prioriteetset ülesandest ja marsruudist.
4. Täiendavate, suure erivõimsusega energiasalvestite mõju hindamine sõiduki sekundaarsete ehk väikepingeliste ahelate töökindluse ja energiatõhususe paranemisele.
5. Väljatöötatud tehniliste lahenduste ja arvutusmetoodika kohandamisvõimaluste hindamine osaliselt elektrilistele sõidukitele (hübriid- ja diiselelektrilise veoajamiga sõidukid).
6. Kokkuvõtavad järeldused ja ettepanekud Tallinna elektertranspordivõrgu energiatõhususe parendamiseks ja edaspidiste vastavasisuliste uurimistööde suuna kättenäitamine.

Kasutatud uurimismeetodid ja -vahendid

Tehnika taseme ja salvestustehnoloogiate võrdlev analüüs ehk reproduktiivne osa põhineb erialakirjanduses ja konverentsikogumikes avaldatud materjalidel.

Produktiivne osa ehk energiasalvestite parameetrite arvutused elektertranspordi energiavarustuse põhiahelates konkreetsete objektide näitel põhinevad varasemate uurimisprojektide käigus registreeritud aegridade statistilisel analüüsil. Energiasalvesti mõju väikepingeahelate funktsionaalsusele on analüüsitud simulatsioonimudelite abil.

Statistiliseks analüüsiks on kasutatud tabelarvutusprogrammi *Excel (Microsoft)* koos integreeritud kõrgkeelse lisandiga *Visual Basic for Applications (VBA)*. Ahelate simuleerimisel leidis kasutust tarkvarapaketi *MATLAB (MathWorks)* osaks olev keskkond *Simulink*.

Teaduslik uudsus

1. On loodud ekspertmudelil põhinev linna elektertranspordisüsteemi energiatõhususe analüüsimeetodika.
2. On välja töötatud aegridade statistilisel analüüsil põhinev elektertranspordi energiasalvestite arvutusmeetod.
3. On uuritud ja katseliselt kinnitatud kergröõbassõidukite väikepingeahelate töökindluse parandamise võimalust täiendava, suure erivõimsusega energiasalvesti lisamisega.

Töö praktiline väärtus

Uurimistöö käigus loodud energiasalvesti arvutusmeetod lubab elektertranspordi operaatorfirmadel teha järeldusi oma sõidukipargi ja infrastruktuuri energiatõhususe kohta. Statistilisel lähenemisel põhinev arvutusmetoodika aitab kaasa sobivate näitajatega energiasalvesti valikule, eeldamata seejuures täiendavate tarkvarapakettide soetamist. Tulemusena vähenevad kaod kontaktliinides ja

energiatarbimine keskpingevoõrgust. Arvutusmeetodika on rakendatav ka hübriidajamiga sõidukitele primaarenergiaallika õigeks dimensioneerimiseks.

Aprobatsioon

1. Vinnikov, D.; Hõimoja, H.; Rosin, A.; Egorov, M. (2009). Load Leveling and Loss Minimization in Tram Systems - Possibilities and Challenges. *Техническая электродинамика. Тематический выпуск*, pp. 83 - 88.
2. Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Jalakas, T. (2009). Analysis and Design of Ultracapacitor-Boosted Back-Up Power Supply for Trams. In: *Proceedings of International IEEE Conference EUROCON'2009*. May 18-23, 2009, St.-Petersburg, 2009, pp. 598 - 604.
3. Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Strzelecki, R. (2009). Application of Ultracapacitors in Low-Voltage Power Supply Systems of Light Rail Vehicles. In: *The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering, OJEEE Vol 1, No 1, July 2009: The 2009 World Congress on Electronics and Electrical Engineering, WCEEENG'09*, 6.-8. aprill 2009. Cairo, 2009, 5 p.
4. Hõimoja, H.; Rosin, A. (2009). Optimization of Energy Flows in Public Electric Transportation. In: *6th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering"*, Doctoral School of Energy and Geotechnology, 12.01.-17.01.2009., pp. 108 - 112.
5. Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Rosin, A. (2008). Control Basics of Flywheel-powered Uninterruptible Motor Drive. In: *Proceedings of the 11th Biennial Baltic Electronics Conference*, Tallinn University of Technology, October 6-8, 2008, Tallinn, pp. 289 - 292.
6. Hõimoja, H.; Lehtla, M. (2007). Kinetic Energy Storage Systems. In: *8th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Tallinn, 14-15.06.2007. pp 284 - 288.
7. Hõimoja, H. (2006). Kinetic Energy Storage in Electric Traction Applications. In: *Tarptautines konferencijas Elektros ir vladymos technologijos - 2006 : pranešimu medžiaga – Proceedings of the International Conference on Electrical and Control Technologies -*, Kaunas, 4-5 May 2006., 4 p.

Lõpetuseks tänan oma juhendajat, TTÜ elektriinženeri ja jõuelektroonika instituudi juhatajat prof Juhan Laugist igakülgse abi ja nõustamise eest, kolleege vanemteadureid Madis Lehtlat ja Argo Rosinat ning teadur Indrek Roastot varasemate uurimistööde tulemuste jagamise eest. Väitekirja valmimist toetasid oskusteabega ka hr Jevgeni Zautin, Gennadi Marin ja Valdur Järv (Tallinna Trammi- ja Trollibussikoondis), hr Rudolf Kaupmees (Elektriraudtee AS), Dr-Ing Frank Täubner (rosseta Technik GmbH), Dipl-Ing Dietrich Habel (Piller Germany GmbH), Dipl-Ing Frank Steinhorst (Hamburger Hochbahn AG), Prof Dr-Ing Andreas Steimel (Ruhr-Universität Bochum) ja hr Hanspeter Hediger (Basler Verkehrs-Betriebe).

Lühendid

3G	kolmanda põlvkonna mobiilne andmeside	IGBT	isoleeritud paisuga bipolaartransistor
AP	rakendusvärat	LiIo	liitium-ioonaku
APS	abitoitemuundur	LiPo	liitium-polümeeraku
APS	abitoiteallikas	MDS	magnetodünaamiline salvesti
BCC	langetus-tõstemuundur	MVSG	keskpinge lülitusaparatuur
CA	juhttoime	NiCd	nikkel-kaadmiumaku
CI	andmeliides	NiMH	nikkel-metallhüdriidaku
CN	kontaktvõrk	PB	energiasiin
DB	andmesiin	PCC	eellaadimisahel
DB	tundetustsoon	PI	jõuliides
DCSG	alalispinge lülitusaparatuur	PWM	pulsilaiusmodulatsioon
DGA	diisel-generaator agregaat	RAMS	töökindlus, kasutatavus, hooldatavus, ohutus
DP	andmevärat	RFI	elektromagnethäirete filter
DSP	numbriline signaaliprotsessor	SM	energiasalv
ECSM	elektrokeemiline salv, aku või akupatarei	SPP	sisendvärat
EDGE	parendatud andmeedastuskiirusega mobiilside	SS	salvestusalajaam
EMC	elektromagnetiline ühilduvus	TD	veoajam
EMWA	eksponentsiaalselt kaalutud libisev keskväärtus	TS	veoalajaam
ESU	energiasalvesti	TTL	transistor-transistor-loogika
EV	elektersõiduk	TTTK	Tallinna Trammi- ja Trollibussikoondis
FPGA	programmeeritav maatriksstruktuur	UC	ülikondensaatorpatarei
FW	hooratas	VBA	Visual Basic for Applications
GPRS	raadio pakettandmeside	WiMAX	üleilmne mikrolaine-andmesidestandard
GTO	paisuga suletav türistor	WLAN	juhtmevaba kohtvõrk

Sümbolid

A	ristlõike pindala
a_e	ekvivalentne aeglustus
C	mahtuvus
DCE	tühjenemise võimekus
DOD	tühjenemise aste
F_{br}	pidurdusjõud
f_{occ}	suhteline esinemissagedus
I	vool
J	inertsimoment
k	Peuker'i konstant
L	induktiivsus
LR	laadimine madala intensiivsusega
m	mass
n	pöörlemiskiirus
P	võimsus
PD	võimsuse puudujääk
Q	aku mahutavus
R	takistus
r	autokorrelatsioonikordaja
RB	rekuperatiivpidurdusseisund
RCE	laadimisvõimekus
SOC	laetusaste
T	pöördemoment
T	periood
t	aeg
T_{av}	keskmistamisperiood
T_{int}	integreerimise ajaskaala
U	pinge
v	kiirus
W	energia, salvestusvõime
X	muutuja üldtähis
δ	inertsitegur
μ_0	magnetiline konstant
μ_{br}	magnetiline läbitavus
μ_v	viskoosühordetegur
σ	standardhälve
τ	ajakonstant
ω	nurksagedus

1 Tehnika tase

1.1 Tallinna elektertranspordivõrgu üldiseloostus

Tallinn ja selle lähiümbrus on ainuke piirkond Eestis, kus elektertranspordis kasutatakse tramme, trollibusse ja elektrironge. Elektrifitseeritud raudteede kogupikkuseks on 132 km, mis moodustab kogu raudteevõrgust kõigest 13,6 % [TAK06], trammiliinide kogupikkuseks 39 km ja trolliliinidel 76 km. Elektrirongiliikluse populaarsuse kasvu põhiliseks takistuseks on infrastruktuuri, eelkõige rööbasteede ebarahuldav seisukord, mis väljendub sõitjate jaoks ebapiisavas keskmises liikumiskiiruses. Riikliku statistika kohaselt on elektertranspordi osakaal kõikidest reisijatevedudest 30 %, mida võib seletada Tallinna suure elanike arvuga. Veeremit tuleb lugeda suuremas osas aegunuks, seda eriti rööbastranspordi osas, mille iga jääb vahemikku 20...30 aastat ja mille uuendamine on seotud pikaajaliste investeeringutega. Riiklikul ja linna tasemel on koostatud mitmeid arengukavasid veeremi ja infrastruktuuri kaasajastamiseks, pikaajalises plaanis on lisada trammiliine Tallinna-lähedastesse uusasumitesse [TAL03] [ÜTA06].

Trammi- ja trolliliiklust korraldab Tallinna Trammi- ja Trollibussikoondise AS (TTTK), mille kontaktvõrku varustavad 19 veoalajaama. Alalisvoolukaablite kogupikkuseks on 44,5 km ja kontaktliinidel 115 km.

Elektrirongidega opereerib Elektriraudtee AS, mille kontaktvõrgu pikkuseks arvestades kahesuunalist liiklust ja haruteid on 268 km. Kontaktvõrgu energiarustus toimub läbi Järve, Keila ja Raasiku veoalajaama.

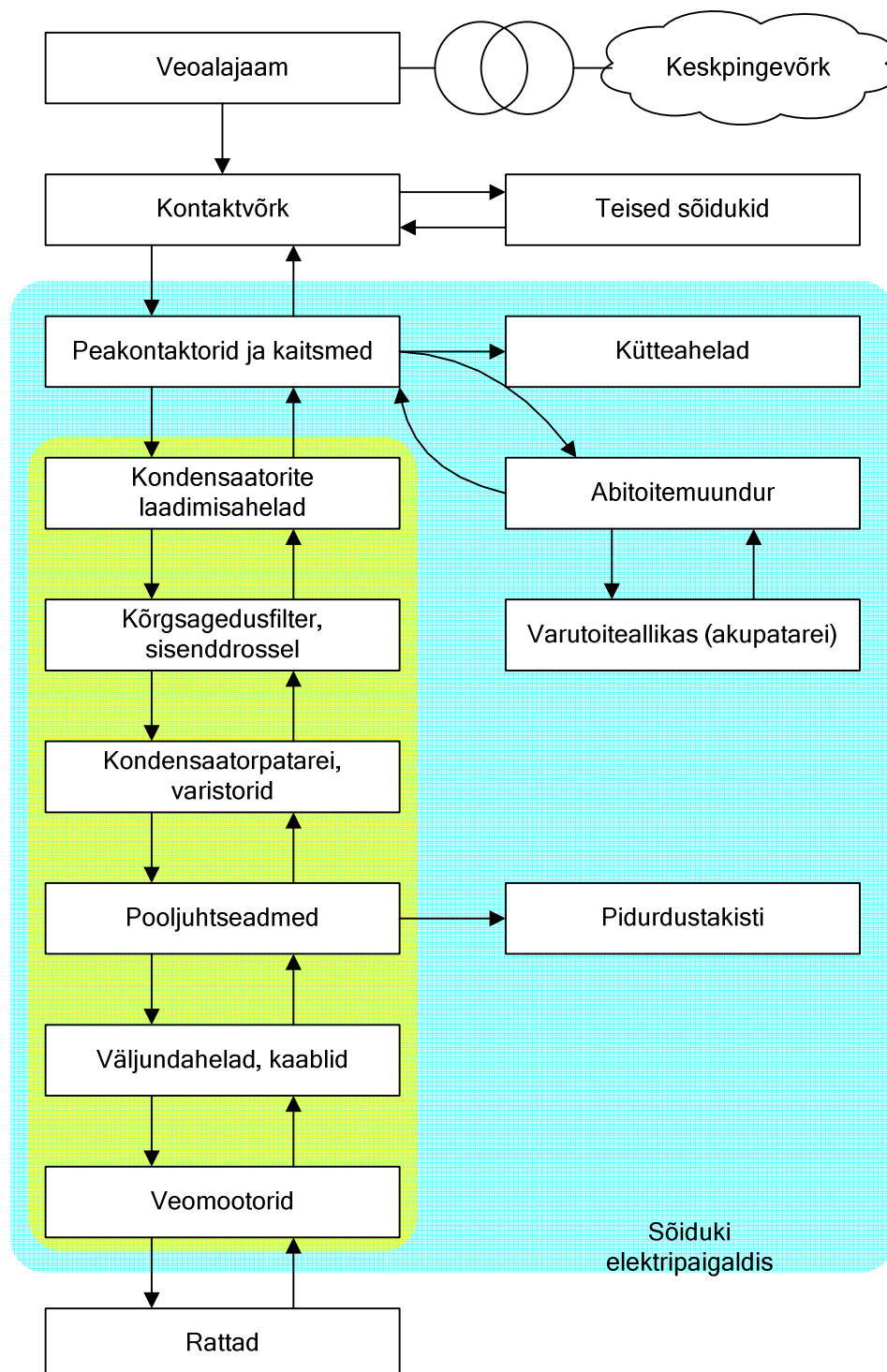
Eesti elektertranspordis kasutatavad pinged on näidatud tabelis 1.1. Viimases veerus kirjeldatud ajutised maksimumid, st pingete väärtused vahemikus $U_{max1} < U \leq U_{max2}$ ei tohi kesta üle 5 min. Selline olukord on lubatav ainult lühiajaliste protsesside puhul nagu rekuperatiivpidurdus ja allikapoolne pinge reguleerimine türistoralaldiga veoalajaamades.

Tabel 1.1. Eestis kasutatavad alalisvoolu veovõrkude pinged [EVS05]

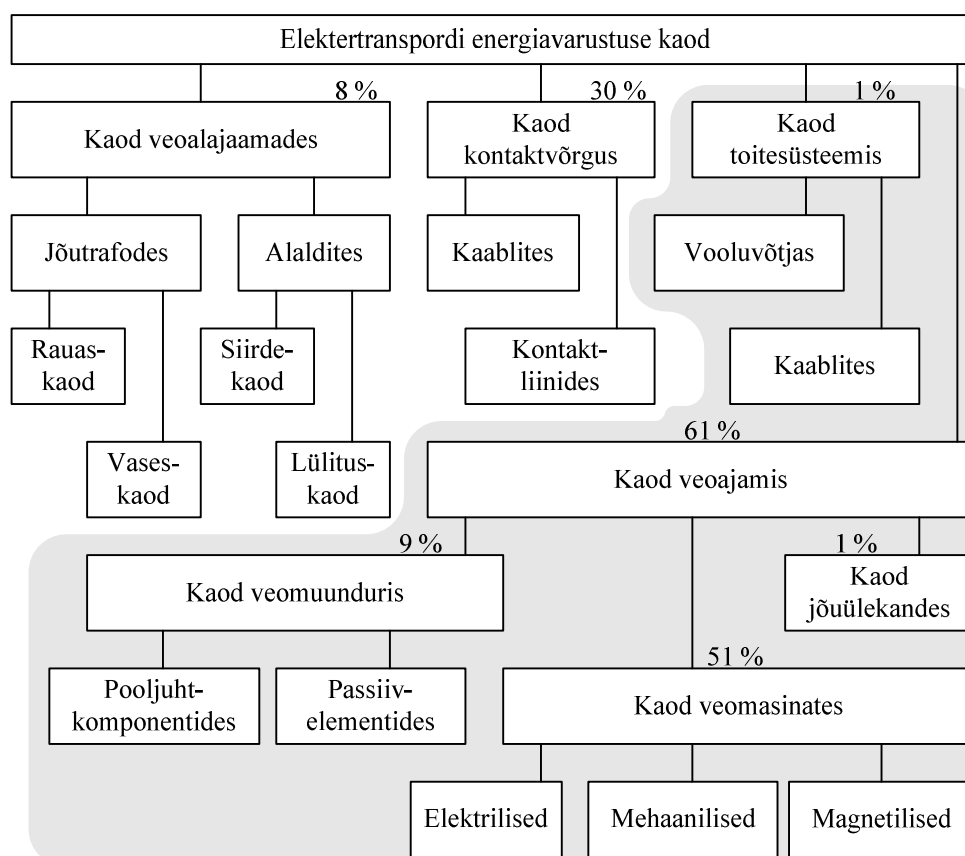
Sõiduk	Madalaim kestev-pinge U_{min} [V]	Nimipinge U_{min} [V]	Kõrgeim kestev-pinge U_{max1} [V]	Kõrgeim ajutine pinge U_{max2} [V]
tramm, troll	400	600	720	800
elektrirong	2000	3000	3600	3900

1.2 Energiamuundusprotsessid keskpinge võrgu ja sõiduki vahel

Kontaktliiniga seotud elektertranspordi toidetakse kas 6 kV või 10 kV keskpinge võrgust läbi veoalajaamade. Kogu energiamuundusahel keskpinge võrgu ja sõiduki rataste vahel on kujutatud joon 1.1. Kõikide muundusprotsessidega kaasnevad paratamatult kaod (joon 1.2), mille vähendamine kõikides osalevates ahelates on energiasäästliku elektertranspordi kontseptsiooni põhiidee. Kadude vähendamine on võimalik nii veovõrgu kui veeremi tasandil nii riistvaraliste kui ka organisatoorsete säästumeetodite rakendamisega.



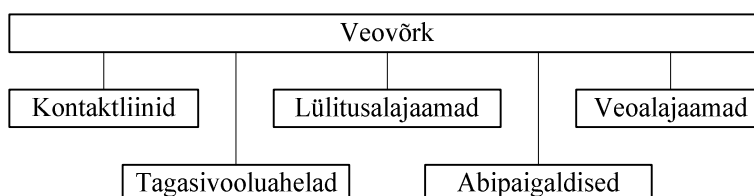
Joonis 1.1. Energiavood jaotusvõrgu ja sõiduki rataste vahel



Joonis 1.2. Kadude liigitus elektertranspordi energiaülekandeahelates [TTÜ08]

Riistvaraliste energiasäästu meetmete hulka kuuluvad tugevvooluahelate ümberehitused, organisatoorse meetmetena saab käsitleda eeskätt juhtimismeetodite valikuga saavutatavat säästuefekti. *Energiasäästuks elektertranspordis tuleb lugeda olukorda, kus võimalikult suur osa tarbitud energiast muudetakse kasulikuks tööks, st liikumistakistuse ületamiseks.*

Eespool kirjeldatud veovõrgu all tuleb mõista veoenergia jaotamiseks mõeldud infrastruktuuri, mille koosseisu kuuluvad kontaktliinid, tagasivooluahelad, veolajaamad energia muundamiseks ja jaotamiseks, lülitusalajaamad ja mitmesugused abipaigaldised (joon 1.3).

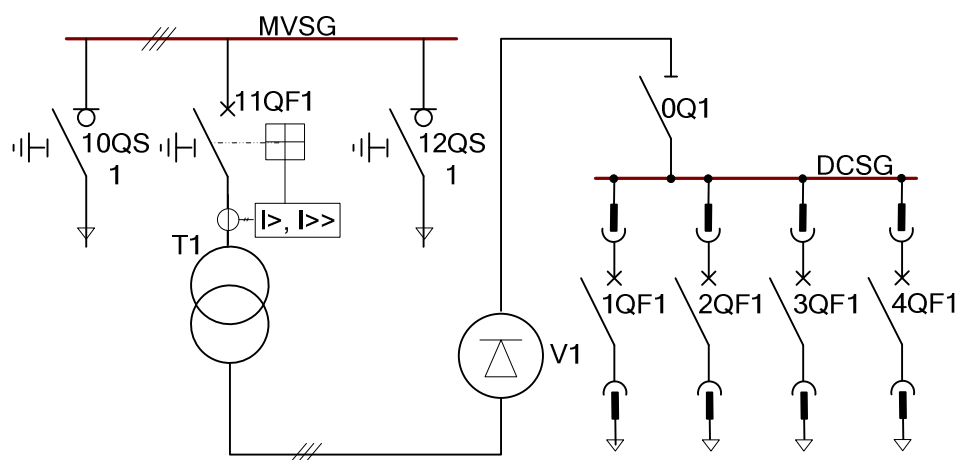


Joonis 1.3. Veovõrgu üldistatud struktuur [EVS05]

1.3 Elektertranspordisüsteemi vealajaamad

Kuna alalisvoolu veovõrke teenindavate vealajaamade olulisimad komponendid on alaldid, kasutatakse tihti ka alaldusalajaamade mõistet. Alalisvoolu vealajaama põhiosad on kujutatud joon 1.4.

1. Keskpinge lülitusaparatuur MVSG primaarpingega 35 kV (raudteel) või 10 kV (tramm, troll).
2. Veotrafo T1.
3. Alaldi V1.
4. Alalisvoolu lülitusaparatuur DCSG nimipingega vastavalt tabelile 1.1.
5. Abiahelad, sh varutoiteallikad.



Joonis 1.4. Alalispinge vealajaama tüüpskeem [KIE01]

Abiahelad on ette nähtud lülitite kommuteerimiseks, releekaitseks ja telemaatikaks. Lisaks toidetakse vealajaamade kaudu turvuaahelaid, st signalisatsiooni, pöörangute ja signaalide tsentralisatsiooni ning blokeeringu seadmeid, mille abil tagatakse ohutu liiklus [TSM99]. Energiavarustuskindluse tagamiseks kasutatakse vealajaamade puhul nagu üldises jaotusvõrguski mitme jõutrafo ja alaldiga paigaldisi ning ringtoidet.

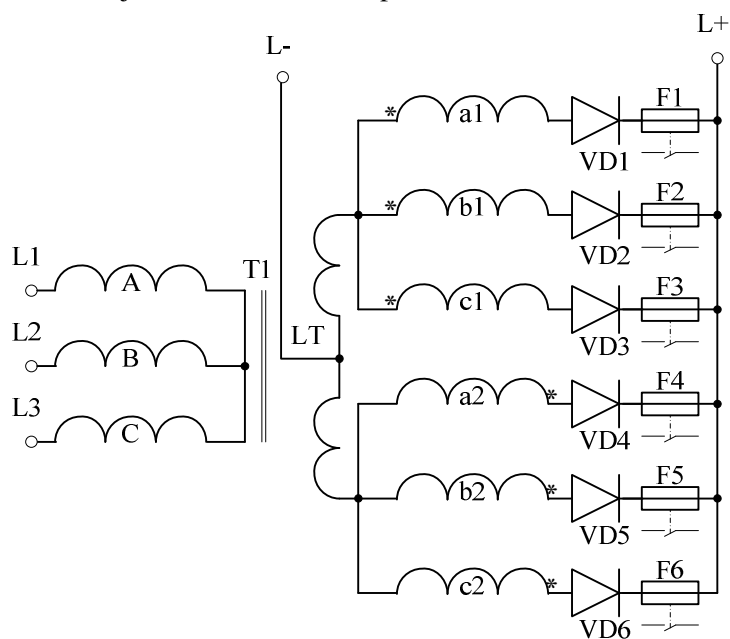
Tabelis 1.2 on toodud elektriraudtee kolme vealajaama ja näitena 2 TTTK trammiliiklust teenindava alajaama võimsused, kui alaldi võimsusteguriks on võetud $\cos\varphi = 0,9$. Ilmneb, et elektriraudtee vealajaamade väljundvõimsus on piiratud veotrafode võimsusega, hilisem analüüs näitab ka vealajaamade üledimensioneeritust kehtivatele oludele.

Tabel 1.2. Tallinna ja lähiümbruse elektertranspordi teenindavad vealajaamad

Vealajaama nimetus	Sõiduk	Veotrafode võimsus [kVA]	Alaldite võimsus [kW]	Arvutuslik võimsus ($\cos\varphi = 0,9$) [kW]
Järve	Elektrirong	12600	19800	11340
Keila	Elektrirong	5920	19800	5330
Raasiku	Elektrirong	12600	19800	11340
Nr 3 ja nr 4	Tramm	2770	2400	2400

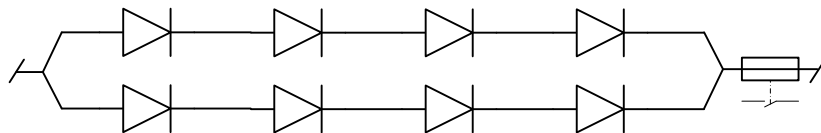
1.3.1 Võimalik energiasääst alaldi topoloogia valikuga

TTTK ja Elektriraudtee veolajaamades kasutatakse pinge muundamiseks jõutrafo ja pooljuhtaladit sisaldavaid agregate (joon 1.5). Seadmed põhinevad M3.2UK topoloogial, st trafo sekundaarpool koosneb kahest tähte ühendatud mähisest, mis toidab ühise katoodiga kuuepulsilist täislainealadit (joon 1.5), mähiste keskpunktid on ühendatud läbi tasandusreaktori LT. Samalaadne tasandusreaktoritega skeem oli kasutusel juba elavhõbealadite puhul [RAN95].



Joonis 1.5. TTK veolajaamades kasutatavate aladite topoloogia

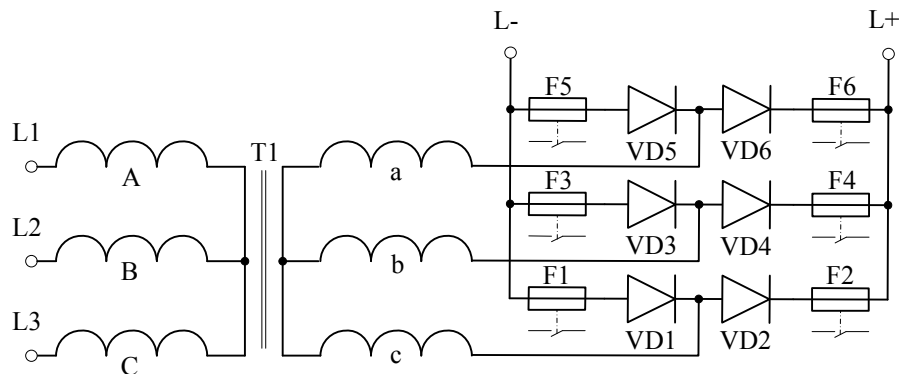
Praegused TTK ja Elektriraudtee veolajaamade aladid konstrueeriti ajal, kui diodide pärioolud ja vastupinged olid tunduvalt piiratumad kui tänapäeval, seetõttu koosneb alaldi iga õlg mitmest jadamisest ja rööbiti ühendatud pooljuhist, nt 1000 A nimivooluga ja 600 V nimipingega TTK aladite VKDL-100/60 õlad VD1...VD6 (joon 1.5) koosnevad tegelikkuses 8 diodist, kus vool jaguneb kahe rööpse 4 diodist koosneva ahela vahel (joon 1.6). Iga õlaga jadamisest on ühendatud signaalkontaktiga kiiretoimelised sulavkaitsmed F1...F6 (joon 1.5).



Joonis 1.6. Diodide ühendused TTK veoladites

Jõupooljuhtide arenguga suurenesid ka kommuteeritavad voolud ja pinged, seetõttu koosnevad kaasaegsete veoladite õlad väiksemast arvust diodidest. Tänapäevased pooljuhtaladid põhinevad töökindlamatel ja suurema

kasuteguriga 6- või 12-pulsilistel täissildtopoloogiatel B6 ja B6.2 (joon 1.7), seejuures viimaste ühendusviis sõltub veovooludest ja -pingetest [WOR98]. Elektriraudtee 3 kV infrastruktuuri rekonstueerimisel on võimalik senised tasandusreaktoriga alaldid asendada 12-pulsiliste sildalalditega.



Joonis 1.7. B6 sildtopoloogiaga kuuepulsiline veoalaldi

Kummagi alalditüübi, M3.2UK ja B6 põhinäitajad on toodud tabelis 1.3. Mõlema olulisemad parameetrid langevad kokku, seejuures ühise anoodiga topoloogia korral on üksikule diodile langev koormus väiksem. Sildalaldi põhieelis seisneb selles, et jõutrafo peab olema ainult ühe sekundaarmähisega, tasandusreaktori ja teise sekundaarmähise puudumine tähendavad vähenenud rauaskadusid, kuid samas suurenevad vaseskaod, kuna iga mähist läbib kaks korda suurem vool. Samas B6 trafo kasutustegur on suurem, mistõttu sama väljundvõimsuse juures on selle gabariidid ja mass väiksemad.

Tabel 1.3. M3.2UK ja B6 sildalaldite võrdlus [RAS06]

Näitaja	M3.2UK	B6
Diiodi suurim korduvvastupinge $U_{R,max}$	$1,06 \cdot U_{dc}$	$1,05 \cdot U_{dc}$
Diiodi keskmine päriivool $I_{F,av}$	$0,167 \cdot I_{dc}$	$0,333 \cdot I_{dc}$
Diiodi suurim korduvvool $I_{F,max}$	$3,15 \cdot I_{F,av}$	$3,14 \cdot I_{F,av}$
Diiodi voolu efektiivväärtus $I_{F,rms}$	$0,293 \cdot I_{dc}$	$0,579 \cdot I_{dc}$
Diiodi voolu kujutegur $I_{F,rms} / I_{F,av}$	1,76	1,74
Trafo primaarmähise võimsus P_{prim}	$1,06 \cdot P_{dc}$	$1,05 \cdot P_{dc}$
Trafo sekundaarmähise võimsus P_{sec}	$1,49 \cdot P_{dc}$	$1,05 \cdot P_{dc}$
Trafo kasutustegur	0,79	0,95
Pulsatsioonisagedus f_r	$6 \cdot f_j$	$6 \cdot f_j$

Alaldite puhul on energiasääst saavutatav pooljuhtidel eralduva kaovõimsuse vähendamiseks. Päripingelangudest U_F ja koormusest $I_{F,rms}$ põhjustatud kadu

$$P_{dis,rec} = n \cdot I_{F,av} \cdot m \cdot U_F, \quad (1.1)$$

kus n on diiodmoodulite arv skeemis ja m jadaühenduses diiodide arv moodulis. Võrreldes käitatavoid alaldeid (joon 1.5 ja 1.6) sildalalditega B6 (joon 1.7) võrdsel koormusvoolul võrdsete päripingelangudega, tulevad kaovõimsused suhtelistes ühikutes vastavalt

$$P_{dis,M3.2UK} = 6 \cdot 0,167 \cdot 4 = 4,00 \text{ p.u.} \leftarrow m = 4$$

$$P_{dis,M3.2UK} = 6 \cdot 0,167 \cdot 1 = 1,00 \text{ p.u.} \leftarrow m = 1$$

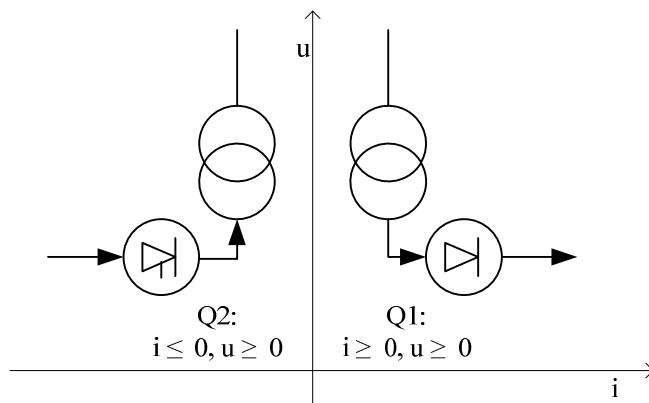
$$P_{dis,B6} = 6 \cdot 0,333 = 2,00 \text{ p.u.} \leftarrow m = 1$$

Seega, veolajaamade alaldite perspektiivsel rekonstrueerimisel on soovitatav, kas

- 1) vahetada alaldi jada-rööpdiodid võimsamate vastu, jättes üldise topoloogia ja jõutrafo endiseks, või
- 2) terve agregaadid väljavahetamisel kasutada ühe sekundaarmähisega jõutrafo komplekteerituna B6 sildalaldiga.

1.3.2 Energiasääst pidurdusenergia tagastamisega keskpinge võrku

Veolajaamade diodalaldid töötavad ainult esimeses kvadrantis, st nende vool ja pinge on alati positiivsed. Et muuta võimalikuks rekuperatsiooni käigust toodetud elektrienergia tagastamine keskpinge võrku, peavad veolajaamad olema võimelised töötama nii esimeses kui teises kvadrantis, säästes energia, mis muidu hajuks pidurdustakistitel (joon 1.8).

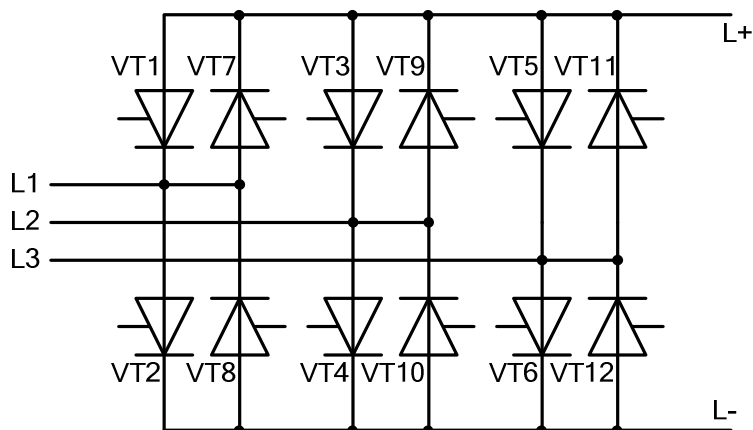


Joonis 1.8. Veolajaama energiavood 1. ja 2. kvadrantis

Energiavoogude optimeerimise seisukohalt tuleb teatud tingimustel kõne alla ka türistoralaldite kasutamine, mis võimaldab teatavates piirides reguleerida kontaktliini pinget vastavalt võrgus toimuvatele kõikumistele. Türistoralaldi sildtopoloogia on sarnane joon 1.7 kujutatule, ainsa erinevusena on skeemis diodid asendatud türistoridega. Sundkommutatsiooni rakendamise saab realiseerida ka ülekoormus- ja lühisekaitset elektromehaanilisi komponente kasutamata. Pinge reguleerimisega saab vähendada liini teenindavate veolajaamade arvu [FLO95] [SIE09]. Tüürnurgaga energiavoogude juhtimise tõsisemaks puuduseks on harmooniliste suur osakaal.

Kaasaegsetes energia tagastamisega veolajaamades kasutatakse tüürnurgaga reguleerimise asemel pulsilaiusmodulatsiooni (PWM) juhtimisega kahesuunalisi muundureid (joon 1.9), mis võivad töö käigus sujuvalt üle minna ühest kvadrantist teise. Selliste muunduritega komplekteeritud veolajaamade reaktiivenergia tarbimine on nullilähedane, samuti tekitavad need vähem harmoonilisi kui diod-

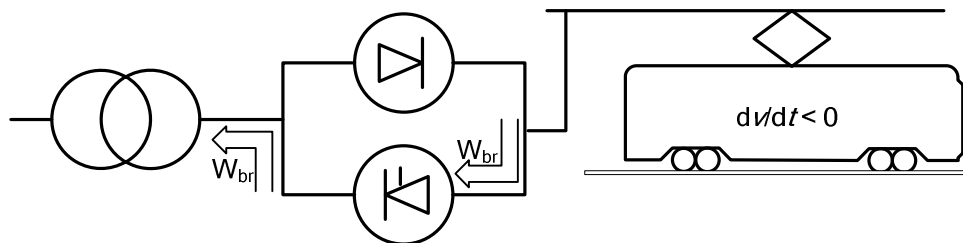
ja tüürnurga reguleerimisega türistoralaldid [RAN95]. Türistoride asemel võetakse muundurites järjest enam kasutusele IGBT transistore, mille juhtimisriist- ja tarkvara on tunduvalt lihtsamad.



Joonis 1.9. Kahesuunalist energiavahetust võimaldav sildmuundur

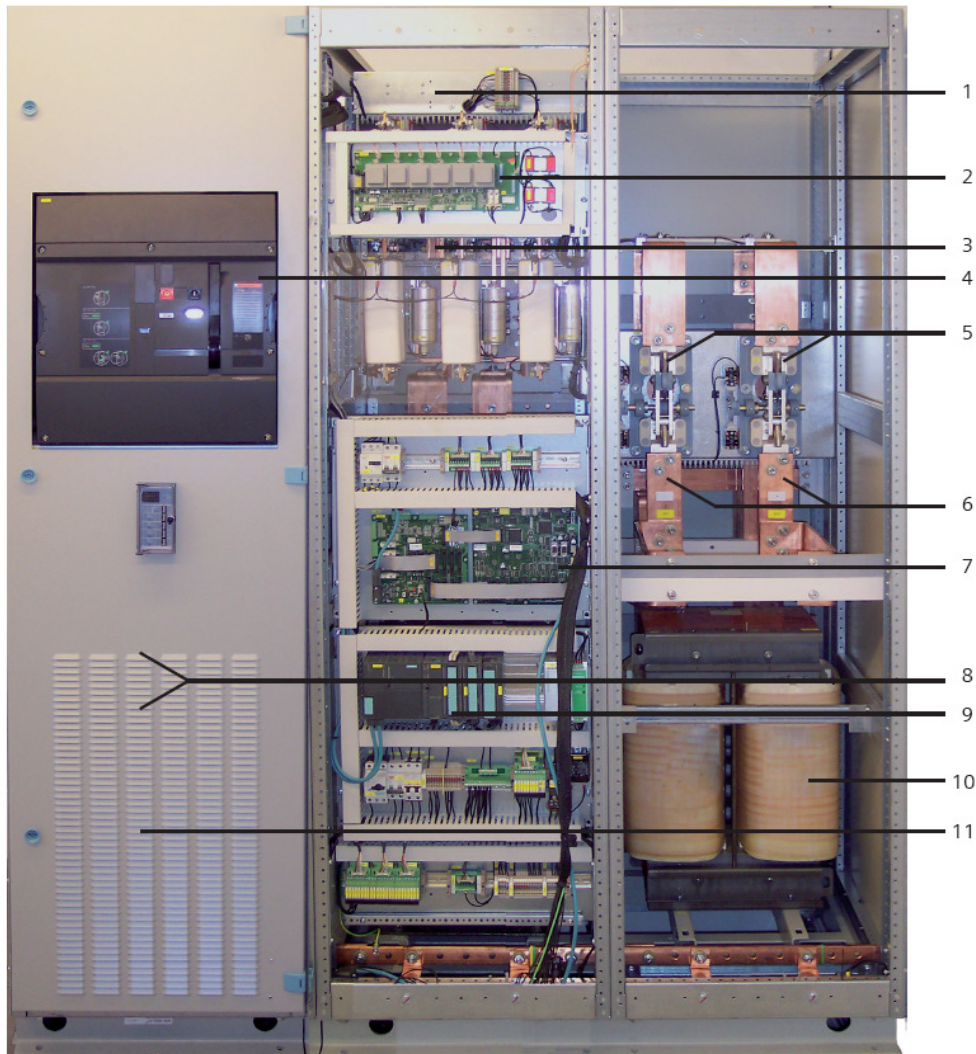
Selliste kahesuunaliste muunduritega komplekteeritud veolajaamade põhipuudusteks on kõrge maksumus ja madal töökindlus, mistõttu leiavad need ka vähe rakendust hoolimata energiasäästuga kaasnevast kasust. Dioodalalditel puuduvad välised juhtimisahelad, mis ei too kaasa vajadust keerukate mikroprotsessortehnikal põhinevate reguleerimisahelate järele. Kompromissina veomuunduri mõõtmete, maksumuse ja energiasäästu omaduste vahel tuleb kõne alla kasutada lahendusi, kus dioodalaldit täiendatakse vastuparalleelse vaheldiga (joon 1.10). Viimane töötab alaldist sõltumatult, ülesandega tagastada pidurdusenergia W_{br} keskpingevõrku.

Varasematel raudteeuuringutel [SUZ82] tehti kindlaks, et alaldi ja vaheldi võimsuste suhe kõigub vahemikust 1:3 kalletel kuni 1:13...1:33 lauskmaal. Võimsuste erinevuse põhjuseks on asjaolu, et rongide võimsus pidurdustalitluses on reeglina väiksem voolust mootoritalitluses. Seega, olemasoleva alaldiga vastuparalleelse vaheldi soetamine tuleks tunduvalt soodsam kui alaldi vahetamine kahesuunalise muunduri vastu, ka ei halveneks paigaldise töökindlus, kuna vaheldi tõrke korral säilib kontaktliini toide ja liiklus jätkub häireteta.



Joonis 1.10. Pidurdusenergia tagastamine vastuparalleelse võrguvaheldiga [MEI07]

Joon 1.11 on näitena kujutatud firma *Siemens* võrguvaheldi *Sitras TCI*, mille põhikomponentideks on 1 – jahutusventilaatorid, 2 – türistoride ohjemoodul, 3 – sildlülituses türistorid, 4 – vahelduvvoolu pealüliti, 5 – alalisvoolu lahklüliti, 6 – alalisvoolukaablite klemmid, 7 – vooluregulaator, 8 – vahelduvvooluklemmid autotrafo ühendamiseks, 9 – peakontroller, 10 – alalisvoolu siludrossel, 11 – vahelduvvooluklemmid jõutrafo kaablite ühendamiseks.

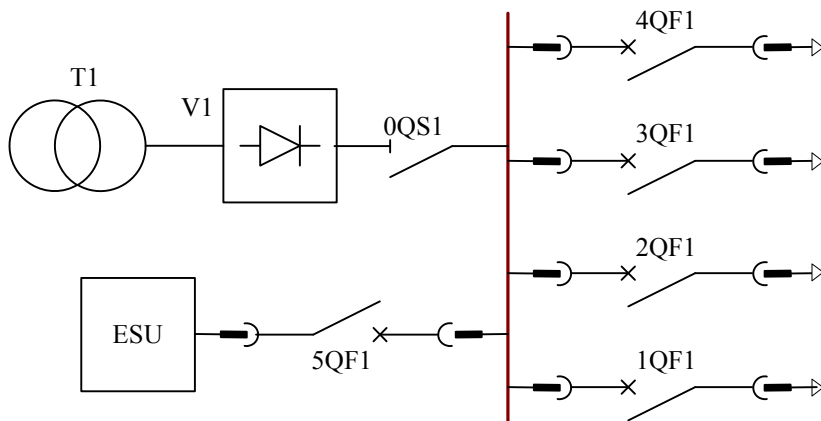


Joonis 1.11. Võrguvaheldi pidurdusenergia tagastamiseks keskpingevärku [SIE09]

Senised kogemused näitavad, et keskpingevärku tagastatud pidurdusenergia võib moodustada kuni 40 % tarbitud energiakogusest [MEI07] [SUZ82]. Kahesuunalist veomuundurit või dioodalaldi-vaheldi kombinatsiooni saab kasutada samuti süsteemi võimsusteguri parandamiseks ja keskpingevärku genereeritavate harmooniliste vähendamiseks [RAN95].

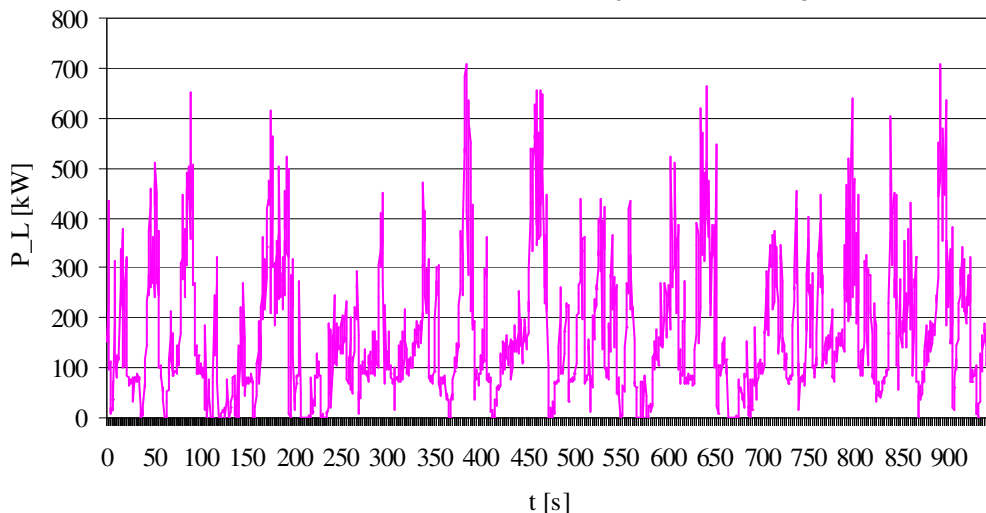
1.3.3 Energiasääst salvestiga veolajaamas

Kui keskpingevõrgu haldaja ei näe ette elektrienergia tagastamist, võib pidurdusenergia salvestada statsionaarsesse energiasalvestisse ESU, mis on ühendatud alajaama alalisvoolulattidele (joon 1.12), et seda hiljem kasutada kiirendavate sõidukite toiteks. Energia kokkuhoidu hinnatakse erinevate allikate andmetel 20 % [ROS06], 30 % [HAL02] [MEI07] kuni 40 % [SIE09] võrra.



Joonis 1.12. Salvesti ühendamine veolajaama alalisvoolulattidele

Lisaks pidurdusenergia salvestamisele aitab veolajaama paigutatud salvesti vähendada tipukoormusi. Veolajaamade koormus kõigub suurtes piirides tänu sõidukite energiatarbimise eripäradele, nt joon 1.13 ilmestab Tallinnas Lubja tõusul asuvat kahe-suunalist trammiliini lõiku toitva veolajaama koormusgraafikut.



Joonis 1.13. Kallakul paikneva trammiliini lõiku teenindava alajaama koormusgraafik

Mitme sõiduki üheaegsel kiirendamisel tekkivad voolutõuked põhjustavad kontaktliinis pingelange ja halvimal juhul kaitseaparatuuri rakendumist

veoalajaamas, põhjustades liiklusseisakuid. Koormus sõltub peamiselt liiklus- ja maastikutingimustest (liikumine lauskmaal, üles- või allamäge) ning sõiduplaanist, võimsusgraafikute modelleerimiseks uutele lõikudele kasutatakse mitmesuguseid arvutuspakette [KUO98].

Tabelis 1.4 on võrreldud kahe – Bochumi ja Hamburgi – kergrööbastransporti teenindava veoalajaama energiasalvesteid. Võib järeldada, et alajaamas paikneva salvesti energiasääst on otseses seoses liikluse intensiivsusega.

Tabel 1.4. Veoalajaama salvestite võrdlus [HOC07] [SIE09]

Näitaja	Bochum, BOGESTRA	Hamburg, HOCHBAHN
Mahutavus $W_{ESU,eff}$	2,3 kWh	5,0 kWh
Suurim hetkvõimsus P_{max}	1,0 MW	1,0 MW
Tehnoloogia	ülikondensaatorid	hooratas
Prognoositav energiasääst aastas	37 000 kWh	430 000 kWh

Veoalajaamades paiknevad energiasalvestid võimaldavad energiasäästu pidurdusenergia salvestamisega ja koormuse silumist, kuid nende põhipuuduseks tuleb lugeda asjaolu, et tsentraliseeritud energiasalvestuse korral jäävad endiseks kaod, mis on seotud energia ülekandega kontaktvõrgus [CHY06].

Hamburgi kergrööbastransporti toetav energiasalvesti (tabel 1.4) on gabariitide illustreerimiseks kujutatud joon 1.14. Illustratsioonilt puuduvad pidurdustakistid, mis on vajalikud pidurdusenergia hajutamiseks salvesti ressursside ammendumisel. Osad allikad [OPT07] [RIC02] [ROS06] soovivad kasutada hooratassalvesteid, mis võtavad alajaamas ülikondensaatorpatareidega võrreldes vähem ruumi.

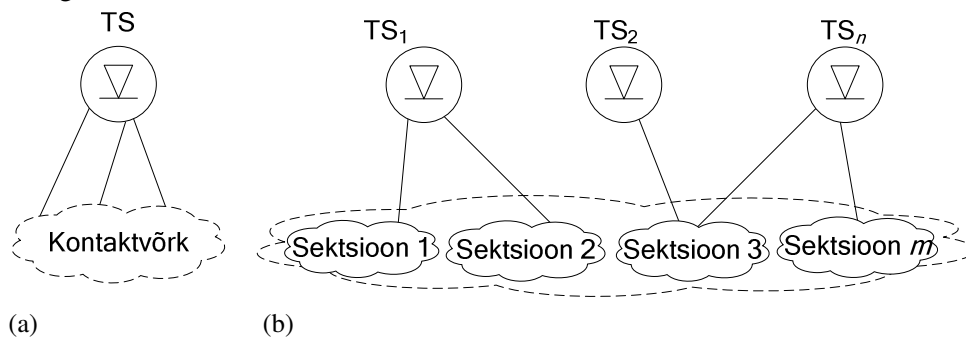


Joonis 1.14. Veoalajaama statsionaarne energiasalvesti [HOC07]

1.4 Energiasäästu võimalused veoenergia jaotamisel

1.4.1 Veovõrkude struktuurid

Veoenergia jaotamiseks on võimalik kasutada nii tsentraliseeritud kui ka detsentraliseeritud võrke (joon 1.15). Tsentraliseeritud konfiguratsiooni korral toidavad tervet veovõrku üksikud veoalajaamad (joon 1.15a). Kuigi veoalajaamade arv sellises võrgus on väiksem, on alalisvoolukaablite kogupikkus tunduvalt suurem ja võrgu kui terviku töökindlus madalam; seetõttu pole tsentraliseeritud energijaotus elekterveol niivõrd levinud kui detsentraliseeritud. Tsentraliseeritud energiaravustuse näiteks on Elektriraudtee kontaktvõrk.



Joonis 1.15. Tsentraliseeritud (a) ja detsentraliseeritud (b) alalisvoolu veovõrk

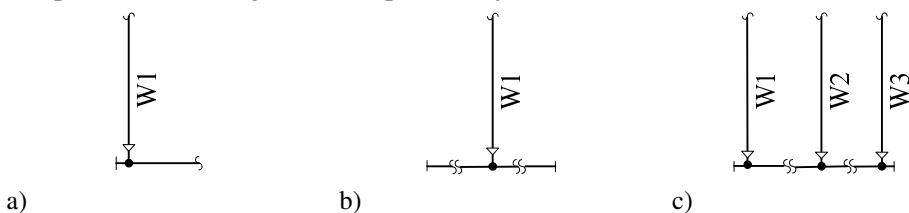
Detsentraliseeritud energijaotuse korral koosneb veovõrk mitmetest ühe või enama alaldiga veoalajaamast, mis toidavad üksteisest liinilahutitega eraldatud kontaktliini seksioone (joon 1.15b). Seejuures võib üks veoalajaam toita mitut seksiooni või üks seksioon võib saada toite mitmelt veoalajaamalt korraga. Viimasel juhul on põhieeliseks reserveeritavus, st ühe alajaama rikke puhul saab koormuse üle kanda teisele. Puuduseks omakorda tuleb lugeda kaitseaparatuuri selektiivsuse tagamist, kuna ülekoormus või lühis ühes seksioonis ei tohi põhjustada ülejäänud seksioonide rivist väljalangemist. Detsentraliseeritud energiaravustust kasutab ka TTTK.

1.4.2 Kontaktliinide üldiseloostus

Elektertranspordi infrastruktuuris on kontaktliinid passiivelementideks, mis osalevad energia ülekandmises veoalajaamast sõidukisse. Pingelangud liinis sõltuvad kontaktjuhtmete materjalist ja ristlõigetest ning on määravaks teguriks veoalajaamade asukoha planeerimisel [KIE01]. Kontaktliinide projekteerimine kujutab endast optimeerimisülesannet, mille eesmärgiks on minimeerida pingelangusid ja seega ka energia ülekandega seonduvaid kadusid vähima maksumuse juures [MEI07]. TTTK ja Elektriraudtee kontaktvõrkude projekteerimisel aluseks olnud NSVL normide alusel valiti toitepiirkond pikkusega, mis tagas minimaalse lühisvoolu, kindlustades veoalajaamas paikneva kaitse rakendumise lühisele.

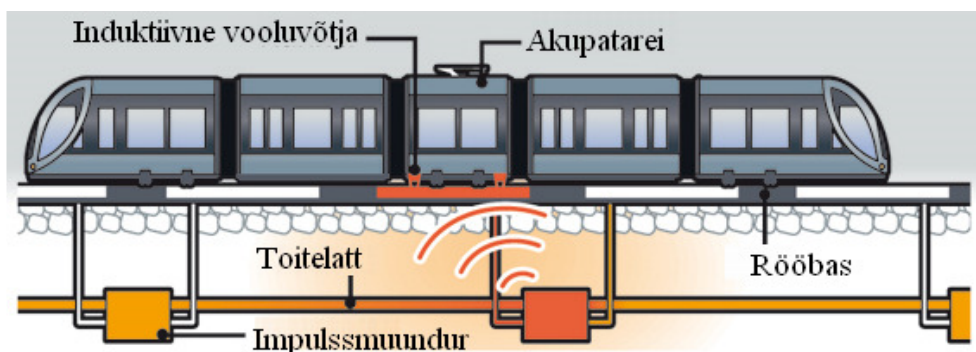
Elektertranspordi kontaktjuhtmed valmistatakse kas vasest või legeeritud pronksist, mille lubatud keskmine voolutihedus on kuni 5 A/mm^2 , juhtmete ristlõiked on vastavalt paigaldamise ajale 80 mm^2 , 100 mm^2 või 120 mm^2 . Kehtivate normide järgi võib kontaktliini pinge kõikuda piirides $\pm 30\%$ arvestatuna nimipingest. Kontaktliini juhtivuse parandamiseks, toitepiirkonna lõpul lühisvoolu suurendamiseks ja pingekadude vähendamiseks ühendatakse sama polaarsusega juhtmed pingetasandussildade abil kokku. Pingetasandussildade vahekaugus valitakse vahemikus $300 \text{ m} \dots 500 \text{ m}$. Energiaedastuseks veolajaamast kontaktliinidesse ja rööbastesse kasutatakse vasest või alumiiniumist alalisvoolukaableid, TTK puhul ristlõigetega $240 \text{ mm}^2 \dots 800 \text{ mm}^2$. Kontaktliinide ja alalisvoolukaablite ühendamiseks on kolm põhilist võimalust (joon 1.16):

1. Ühepoolse liinilõigu algusesse ühendatud toitega skeem on iseloomulik liinilõigule, mis läbib alajaama vahetu läheduse. Skeemi puuduseks suur pingekadu lõigu teises otsas (joon 1.16a).
2. Lühikeste liinide puhul toidetakse sektsiooni keskelt (joon 1.16b). Selline lahendus on ökonoomsem ja kaod võrgus on minimaalsed.
3. Pikemaid sektsioone toidetakse suuremate pingelangude vältimiseks paralleelkaablitega mitmest punktist (joon 1.16c).



Joonis 1.16. Alalisvoolukaablite ja sektsioonide ühendusviisid [RIE01]

Metroodes kasutatakse elektrienergia ülekandmiseks kontaktjuhtmete asemel nn voolujuhtivat kolmandat rööbast, mis lubab ehitada metrootunnelid madalamana [RIE01]. Harvem kasutatakse induktiivset energiaülekannet, kus rööbaste vahele on paigutatud primaar- ja sõiduki põhja alla sekundaarmähised [TUT07]. Firma *Alstom Transport* kontaktjuhtmevaba lahendus on kujutatud joon 1.17.



Joonis 1.17. Juhtmevaba energiaülekanne [ALS08]

Kontaktjuhtmevaba energiaülekanne on mõeldud kasutamiseks vaid juhtudel, kui linnaarhitektuurilised tingimused ei soosi õhuliinide ehitamist. Induktiivsel energiaülekandel tekivad lisakaod nii puisteväljas kui ka primaarmähist toitvas kõrgsageduslikus impulssmuunduris, samuti on vaja kõrgsageduslikku vahelduvvoolu muundada trammi pardal. Tallinna elektertranspordis pole induktiivse energiaülekande kasutuselevõttu lähitulevikus ette nähtud.

1.4.3 Kaod kontaktliinides

Tallinna kontaktliinidest ja rööbastest koosneva energiajaotusvõrgu kasutegur on optimaalsel juhul, kui sõiduk liigub toitepunkti lähedal, vahemikus 93 %...96 %, halvematel juhtudel, kui suurt hetkvõimsust tarbiv sõiduk viibib toitepunktist eemal, langeb see pingelangude tõttu väärtuseni 60 %...70 % [MÄG07] [TTÜ08], mille käigus nende osakaal kogukadudes suureneb võrreldes joon 1.2 tooduga. Järelejäänud osa moodustab kaovõimsuse, mis kuumutab kontaktjuhet ja hajub atmosfääris soojusena. Tegelik pinge sõiduki vooluvõtjal sõltub

- 1) sõiduki asendist kaabli ja kontaktliini ühenduspunkti suhtes;
- 2) summaarsest hetkkoormusest sõiduki asukohas.

Viimasena mainitud sõltuvus tähendab seda, et pinge vooluvõtjal võib langeda teiste samal liinil kiirendavate sõidukite tõttu, kuigi vaadeldav sõiduk võib tarbida keskmisest väiksemat võimsust. Seega võib järeldada, et suurimad pingelangud ja sellega kaasnevad kaod tekivad suurima tõenäosusega toitepunktist kaugemal asuvates lõikudes, kus sõidukid trassi iseloomu tõttu tihti kiirendavad. Tsentraalse energiavarustusega Elektriraudteel kasutatakse pingelangude vähendamiseks paralleelseid kontaktjuhtmeid, mis parandavad ka mehaanilist tugevust.

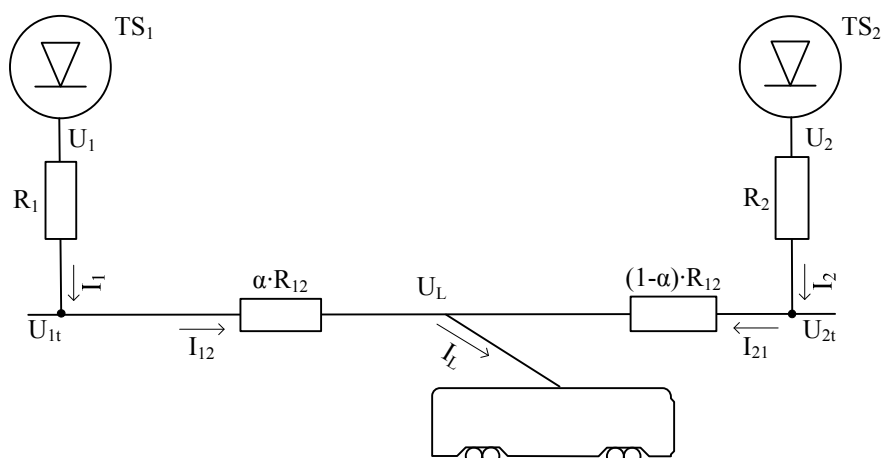
1.4.4 Kadude vähendamine koormuse jaotamisega mitme veoalajaama vahel

Eelpool kirjeldatud kontaktliini pinget antud punktis mõjutavad tegurid annavad aluse abinõude leidmiseks kõikumise vähendamiseks:

- 1) toitepunktide arvu suurendamine sektsioonil;
- 2) koormuse osaline ülekandmine vähem koormatud naabersektsioonile.

Teisena märgitud võimalust tuleb lugeda tasuvamaks, kuna see ei eelda täiendavate alalisvoolukaablite süvistamist. Koormuse võib üle kanda sektsioonilt teisele kas ühe või mitme veoalajaama teeninduspiirkonnas, tehniliselt teostatakse see sektsioonide kokkuühendamise. Selle meetodi juures on oluline tagada kaitse selektiivsus, st sektsioonidevaheline lüliti peab olema lühima rakendusajaga. Kirjanduses [XUZ02] soovitatakse kiiretoimelisuse saavutamiseks kasutada voolutõuke di/dt tuvastusahelaga sümistorlülitid.

Koormuse jaotamist kahe naaberalajaama TS_1 ja TS_2 vahel illustreerib joon 1.18. Ühenduspunktide pinged U_{1t} ja U_{2t} erinevad alajaama lattide pingetest U_1 ja U_2 pingelangude võrra alalisvoolukaablites, mida iseloomustavad jadatakistused R_1 ja R_2 . Toitepunktidevahelised kontaktliini ja rööbaste lõigud moodustavad ekvivalentse takistuse R_{12} . Praktikas jäetakse kaabelliinide takistused arvestamata, kuna pingelang nendes on tühine võrreldes kontaktliiniga.



Joonis 1.18. Koormuse jaotamine kahe naaberalajaama vahel

Alajaamadest TS1 ja TS2 tarbitavad voolud I_1 ja I_2

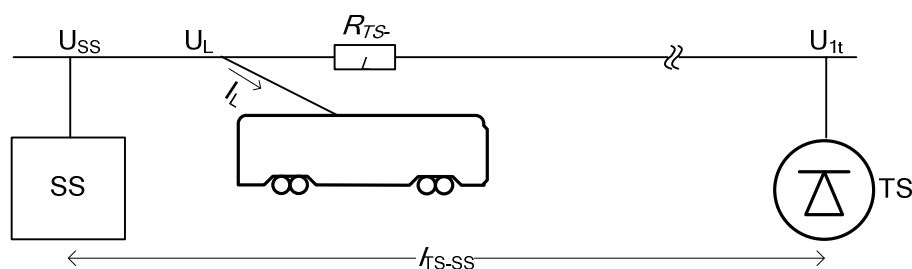
$$I_1 = \frac{(1-\alpha) \cdot R_{12} + R_2}{R_1 + R_{12} + R_2} \cdot I_L$$

$$I_2 = \frac{\alpha \cdot R_{12} + R_1}{R_1 + R_{12} + R_2} \cdot I_L$$
(1.2)

kus I_L on sõiduki koormusvool ja α suhteline (% / 100) kaugus suunal alajaam TS₁ – TS₂. Kui sektsiooni toidavad kolm ja enam alajaama, on võimalik voolude jagunemist arvutada täiendavate valemite abil, türistoralajaamade korral saab alajaamadevahelist koormust jaotada pingete reguleerimisega [SAG04].

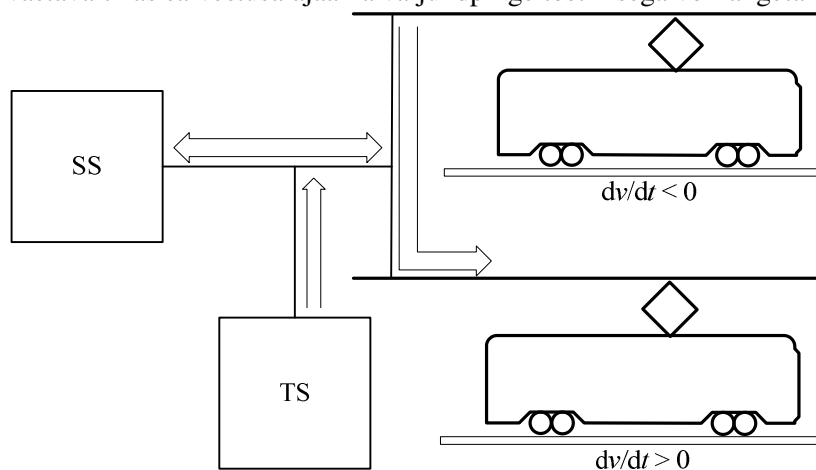
1.4.5 Pingelangude vähendamine ja pidurdusenergia taaskasutus salvestusalajaamade abil

Pingelangude tsentraliseeritud kompenseerimiseks pikkades liinilõikudes (joon 1.19) ja pidurdusenergia taaskasutamiseks (joon 1.20) on energiasalvestid võimalik vealajaamade asemel eraldiseisvate paigaldistena üles seada kontaktliini kõrvale [DES07] [RUF04].



Joonis 1.19. Pinge stabiliseerimine kontaktliini lõpus [HAL02] [RUF04]

Reeglina ühendatakse salvestusalajaamad sellistesse liini punktidesse, kus ülemäärased pingelangud esinevad suurima tõenäosusega. Kasutades samaaegselt ka koormuste jaotamist, võivad salvestusalajaamad teatud määral asendada avariilist või remonditavat ja hooldatavat vealajaama. Joon 1.19 ja 1.20 tähistavad TS vealajaama, SS salvestusalajaama, U_{It} kontaktliini pinget liinilõigu alguspunktis, U_{SS} pinget kontaktliini lõpp-punktis ehk salvestusalajaama klemmidel, U_L pinget vooluvõtjal, R_{TS-L} ekvivalentset liini takistust vealajaama ja vooluvõtja vahel, I_L sõiduki koormusvoolu ja l_{TS-SS} vealajaama ja salvestusalajaama vahekaugust. Kui sõiduk liigub salvestusalajaama lähedal, võib pingelangu tema vooluvõtja ja salvestusalajaama vahel lageda tühiseks, st $U_L \approx U_{SS}$. Pingelangude kompenseerimiseks vajaliku salvesti näitajad valitakse lähtuvalt kontaktliinis hajuvale kaovõimsusele ja on seetõttu väiksemad kui koormuse silumisel [MEI07]. Energiavahetust kontaktliiniga reguleeritakse vastavalt kas salvestusalajaama väljundpinge tõstmisega või langetamisega.



Joonis 1.20. Pidurdusenergia salvestamine salvestusalajaamaga kontaktvõrgus

Allikate [HAL02] [ROS06] andmetel on liini otspunkti paigutatud salvestusalajaamaga võimalik energiasääst kuni 5%. Veovõrkudes kasutatavate salvestusalajaamade näitajatest annab ülevaate tabel 1.5. Samas tabelis kirjeldatud *Rosseta* betoonkonteineris alajaam on kujutatud fotol joon 1.21.

Tabel 1.5. Salvestusalajaamade võrdlus [HAL02] [OPT06] [ROS06]

Tootja	Rosseta	Optimal Energy Systems	Siemens
Sõidukite liik	tramm	linnalähirong	metroo
Mahutavus $W_{ESU,eff}$	6,0 kWh	6,3 kWh	2,5 kWh
Suurim hetkvõimsus P_{max}	1,0 MW	2,8 MW	1,0 MW
Tehnoloogia	hooratas	hooratas	ülikondensaator
Tüübitähis	T6	TESS	Sitras SES
Asukoht	Dessau	New York	Madriid



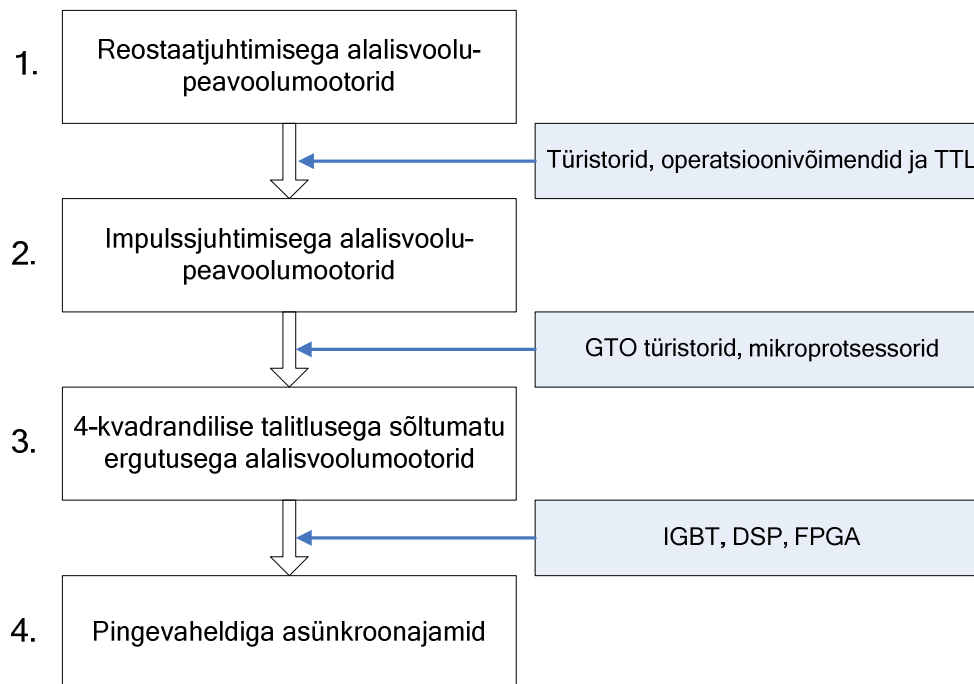
Joonis 1.21. Rosseta salvestusalaajaam hoorattaga [ROS06]

1.4.6 Energiasääst üleminekuga kõrgemale pingeniivoole

Kõrgemal pingel saab sama voolutugevuse juures üle kanda suuremat võimsust või, jättes võimsuse endiseks, vähendada elektrienergia edastamisega kaasnevat kadusid. Standard [EVS05] soovib uute elektertranspordivõrkude projekteerimisel võtta nimipingena kasutusele senise 600 V asemel 750 V. Pinge tõstmisel 25 % võrra väheneks samal koormusel vool samapalju ja ülekandel esinevad keskmised võimsuskadud kahaneksid ruutsõltuvuse tõttu 64 %-ni praegusest. Nimipinge tõstmine olemasolevas infrastruktuuris ja veeremis eeldaks põhjalikke ümberehitusi veoalajaamades, sõidukite ajamite rekonstrueerimist ja jõuahelate väljavahetamist isolatsiooni läbilöögikindluse tagamiseks.

1.5 Veeremi arengutase ja kasutatavad energiasäästumeetodid

Elektertranspordi veoajamite arenguloos võib eristada nelja peamist arenguetappi ehk põlvkonda [SEK05], mis on näidatud joon 1.22.



Joonis 1.22. Veoajamite arenguetapid [SEK05]

1. Esimese põlvkonna veoajamites kasutati kiiruse ja veojõu reguleerimiseks jadaergutusega alalisvoolumootorite ehk peavoolumootorite reostaatjuhtimist relee-kontaktoraparatuuri abil.
2. Teise põlvkonna veoajamid võeti kasutusele pärast türistoride leiutamist, mil ajamite kiirust ja momenti hakati juhtima toitepinge impulssregulaatorite abil. Voolu reguleerimiseks rakendati pidevatoimelisi regulaatoreid ja tagasisideahelaid, mis põhinesid transistor-transistor-loogikal (TTL).
3. Kolmandat põlvkonda iseloomustab täielikult tüüritavate türistoride (GTO) ja mikroprotsessortehnika laialdane evitamine. Tarkvaraline juhtimine avardas oluliselt juhtimisvõimalusi; muutus võimalikuks rekuperatiivpidurdus ja ergutusvoo eraldatud juhtimine.
4. Neljanda ehk nüüdispõlvkonna eelduseks oli IGBT transistoride, numbriliste signaaliprotsessorite (DSP) ja programmeeritavate maatriksstruktuuride (FPGA) kasutuselevõtt. Alalisvooluajamid asendatakse töökindlamate vahelduvvooluajamitega, mis põhinevad enamasti lühisrootoriga asünkroonmootoritel, harvem kasutatakse kontaktivabu püsिमagnetergutusega sünkroonmootoreid. Veoajami toitemuundur baseerub vektorjuhtimisega pingevaheldi topoloogial.

Iga veoajami põlvkonna vahetus on tähendanud ühtlasi ka energiatõhususe kasvu. Loobumine reostaatjuhtimisest tõi kaasa reguleerimiskadude olulise vähenemise, 4-kvadrantiline talitus lubas kasutada sõiduki rekuperateratiivpidurdusel vabanevat energiat teiste samas toitepiirkonnas asuvate sõidukite tarbeks, tagastada selle toitevõrku või salvestada energiasalvestites. Töökindlamate ja suurema kasuteguriga asünkroon- ja sünkroon-veomootorite kasutuselevõtt on veoajamite energiatõhususe viimaseks kasvuetaapiks.

1.5.1 Tallinna elekterveeremi üldiseloostus

Tallinna ja selle lähiümbrust teenindavat elektertransporti iseloomustab kuulumine kindlatesse põlvkondadesse (tabel 1.6). Trammide KT4 komplekteerimine impulss-veomuunduritega on kaasa toonud energiasäästu 48 % võrra võrreldes varem kasutatud reostaatjuhtimisega [TTÜ08]. Edasine sääst on võimalik vaid rekuperatiivenergia ärakasutamisega.

Tabel 1.6. Tallinna elektertransporti veeremi jaotumine põlvkonniti

Sõiduk	Tootja	Põlvkond	Ehitusaastad
Tramm KT4	ČKD	1.	1981-1991
Tramm KT4 (moderniseeritud)	ČKD	3.	1981-1991
Trollid 14Tr, 15Tr	Škoda	2.	1983-1989
Trollid T12, T18	Solaris	4.	2002-...
Elektrirong ER2	RVR	1.	1976-1981

Nagu ilmneb, on omanikud pööranud enim tähelepanu uute trollide soetamisele, lähiaastatel on TTTK-l plaanis asendada kõik olemasolevad 14Tr ja 15Tr tüüpi sõidukid uute, 4. põlvkonna esindajatega [TTK07]. TTTK ja TTÜ koostööna jätkub 1. põlvkonna trammide moderniseerimine 3. põlvkonna omadeks, uute kergrööbassõidukite soetamist pole TTTK juhtkonna poolt lähiaastatel ette nähtud. Elektriraudtee kuulutas 2009. aastal välja riigihanke uue, kokku 18 4. põlvkonna elektrirongi soetamiseks, millel kvalifitseerusid pakkujatena *Stadler Bussnang*, *CAF* ning *Alstom Transport* [ELE09]. Hetkel kasutuselolevate elektersõidukite tehnilised põhinäitajad on toodud tabelis 1.7.

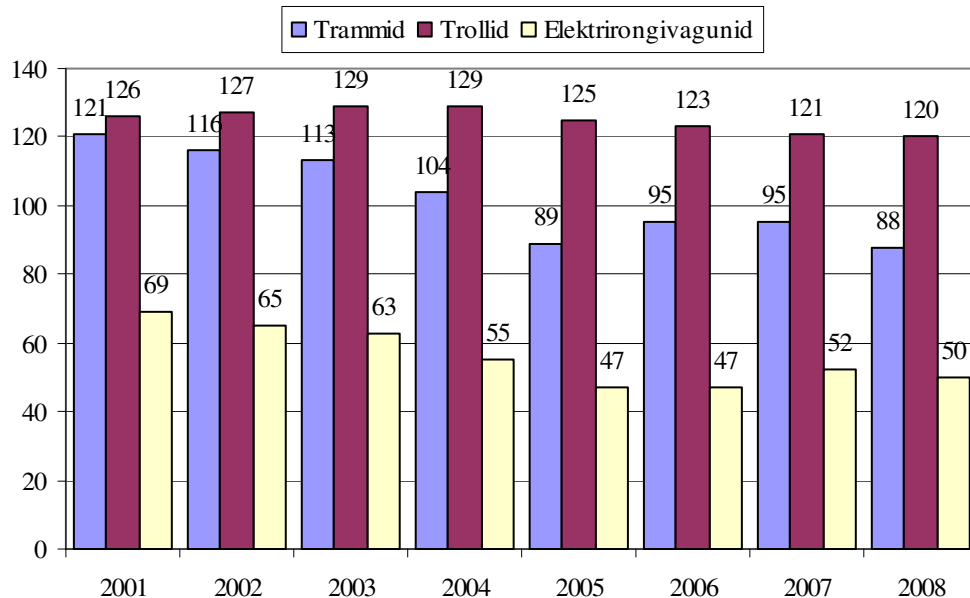
Tabel 1.7. Kasutuselolevate elektersõidukite tehnilised põhinäitajad

Sõiduk	Veojami võimsus [kW]	Konstruktiooniline kiirus [km/h]	Tühimass [kg]	Täismass [kg]	Täis/tühi-massi suhe
KT4	160	65	20300	31600	1,56
14Tr	100	65	10000	18000	1,80
15Tr	200	65	16000	26000	1,65
T12	165	65	10800	19000	1,76
T18	165	65	16000	28000	1,75
ER2	1600 ¹ 2400 ²	130	186000 ¹ 281000 ²	19600 ¹ 296000 ²	1,05

¹ Neljavagunilise koosseisu korral

² Kuuevagunilise koosseisu korral

Tabeli 1.7 viimasest veerust ilmneb, et trollid mahutavad võrreldes oma tühimassiga tunduvalt rohkem reisijaid kui rööbassõidukid, eriti kehtib see rongide puhul. Veeremi arvuline areng on toodud joon 1.23, mis iseloomustab amortisatsioonist tingitud mahakandmisi aastatel 2001-2005.



Joonis 1.23. Elekterveeremi arvuline areng Tallinnas [STA09]

1.5.2 Energiatõhususe parandamine pardapealsete salvestitega

Sõiduki pardapealne energiasalvesti põhiülesandeks on toetada dünaamilisi protsesse nagu kiirendus ja rekuperatiivpidurdus. Pardapealse salvesti peamine eelis statsionaarse ees seisneb asjaolus, et energiavahetus toimub põhiliselt sõiduki sees, st väljaspool kontaktliini. Sellega on võimalik vältida kadusid kontaktliinis, mis kaasneksid tsentraliseeritud energiasalvestusega veoalajaamades. Kirjanduses [GIZ08] [STE07] toodud väidete põhjal on kuni 40 % sõiduki energiavajadusest kiirendusel võimalik katta salvestatud energiaga.

Lisaks dünaamiliste režiimide katmisele annab pardapealsete salvestite kasutamine eeliseid terve infrastruktuuri ulatuses:

1. Võrreldes salvestiteta sõidukitega, võib toitepunktide ja alajaamade arvu liinil vähendada. Pingelangude vähendamisel 50 % võrra võib toitepunktide vahekaugust suurendada kaks korda.
2. Kontaktliinide ja alalisvoolukaablite ristlõige võib olla väiksem, kuna alajaamast sõidukini ülekantav tipuvõimsus väheneb.
3. Liinile võib lasta võimsama veoajamiga, kuid pardapealse energiasalvestiga sõidukeid ilma infrastruktuuri ümber korraldamata.
4. Salvestatud pidurdusenergia taaskasutamisel väheneb energia tarbimine kontaktvõrgust. Kuna pidurduse käigus vabanev energia sõltub sõiduki massist

ja kiiruse ruudust, annab pidurdusenergia salvestamine suurt efekti eelkõige rööbassõidukite korral (tabel 1.7).

- Sõiduki liikumine on osaliselt võimalik ka kontaktliinivabadel lõikudel, kus veoenergia võetakse salvestist.

Kasutatavatest pardasalvestitest annab ülevaate tabel 1.8. Juba 1950. aastatel tootis firma *Oerlikon* nn gürobusse, mille pardal oli vesinikukeskkonda paigutatud 1,5 m läbimõõduga ja 1500 kg massiga hooratas. Sõiduki liikumise ajal töötas ajam generaatoritalitluses; laadimiseks ühendati vooluvõttur 4–6 km vahedega peatustes paiknevate kontaktpindadega. Taolised ”juhtmevabad“ trolid olid käigus 1960ndate aastate alguseni, mil viimane *Oerlikoni* buss puudulike rentaablusnäitajate tõttu käigust maha võeti [BUR98].

Tabel 1.8 Pardapealsed energiasalvestid [BOM08] [REI01] [SIE09] [TUT07]

Tootja	Bombardier	Magnet-Motor	Siemens	Alstom
Sõidukite liik	kergrööbas-sõidukid	trollid	kergrööbas-sõidukid	kergrööbas-sõidukid
Mahutavus $W_{ESU,eff}$	1,5 kWh	2,0 kWh	1,5 kWh	27 kWh
Suurim hetkvõimsus P_{max}	300 kW	150 kW	300 kW	200 kW
Tehnoloogia	üli-kondensaator	hooratas	üli-kondensaator	NiMH aku
Tüübitähis	Mitrac Energy Saver	MDS K3	Sibac ES	

Järgmise turukõlbliku lahenduse töötas 1988. aastal välja ettevõtte *Magnet Motor GmbH* hübriidbussi lisajõuallikana. Süsteemi keskne lüli on nn magnetodünaamiline salvesti (MDS). Nimetatud lahenduses pidurdatakse bussi enamasti elektriliselt, kusjuures tagastatud energia võtab vastu MDS, protsess ise on suure kasuteguriga. Baselis on alates 1992. aastast olnud käigus kokku 12 MDS-iga täiendatud *Neoplani* trolli, mille summaarne tööaeg ületab tänaseks 200 000 tunni piiri [REI01]. Juhikabiini all paiknevad salvestid (joon 1.24) vajavad regulaarset hooldust iga 5000 töötunni järel. Baseli liikluskäitisest saadud andmete alusel on trolliliiklus selles linnas alates 2008. aasta teisest poolest lõpetatud.

Sõiduki energiasalvesti aitab vältida ka kontaktliinide kulumist kaarlahenduste tagajärjel, mida põhjustab kas mustumisest või jäätumisest tingitud halb kontakt vooluvõtja ja liini vahel [FLA05]. Liikumisel sõiduk vibreerib, mistõttu vooluvõtja peab liinini ulatumiseks pidevalt oma kõrgust muutma, ka kontaktjuhe ise liigub tänu tuule kiiruse ja suuna muutumisele ning vooluvõtja survele. Tänu vooluvõtja ja kontaktliini vahelise kontakti kadumisele tekib veomootorite induktiivsustes ülepinge, mis ületab õhu läbilöögitugevuse. Tagajärjeks on kaarlahendus, mis aurustab osaliselt juhtme pinda ja põhjustab selle intensiivset kulumist, millega kaasnevad ka tugevad elektromagnethäired. Kaarlahenduse vältimiseks tuleb vooluvõtja pinge hoida minimaalsel väärtusel normaalse kontakti taastumiseni.

Piisava mahutavusega energiasalvestid tagavad sõidukile teatava autonoomia, st liikumisvõimaluse väljaspool kontaktliini. Kontaktliinivabade elektertranspordi lõikude rajamine võib osutada vajalikuks linnaarhitektuurilistest vajadustest

lähtuvalt, kui muinsuskaitse jm nõuded ei luba keskkonna visuaalset reostamist kontaktvõrguga või kui liinid seavad piirangu muude transpordivahendite kõrgusele. Nt *Citadis* (tootja *Alstom Transport*) trammid Nizzas on varustatud NiMH-akudega ajalooliste keskväljakute ületamiseks 450 m ulatuses, seejuures sõiduki kiirendus on akupatarei tööea huvides piiratud [TUT07]. Väiksemas mastaabis saab kontaktliinivaba liikumist rakendada liinide ristumisel ja pöörangutel, kus sõiduk peaks midu kiirust vähendama. Pardapealse salvesti kasutamisel saaks mainitud infrastruktuuri lõigud läbida püsikiirusel, vältides järgneva kiirendamisega kaasnevat täiendavat energiakulu. Depoo territooriumil annab energiasalvesti suurema manööverdamisvõime.

Kontaktliinivabade lõikude rajamisel tuleb kõik antud marsruuti läbivad sõidukid komplekteerida energiasalvestiga, mis võib osutada kulukamaks täiendava liini ehitamisest. Sõidukite energiasalvesteid tuleks laadida plaanipärase peatuste ajal, kuid kuna peatused on lühemad kui nendevaheline sõit, eeldab suhteliselt suure energiahulga ülekandmine lühikeses ajavahemikus (20 s...30 s) laadimisjaamalt suurt hetkvõimsust. Allikas [STE07] toodud näite põhjal on vajalik võimsus 3 kWh energia ülekandmiseks 20 s vältel 600 kW. Võrguhaldaja seisukohalt on taoline impulsskoormus reeglina ebasoovitav.



Joonis 1.24. Trollibussi pardapealne energiasalvesti

1.5.3 Energiasääst ökonoomse sõidustiili valikuga

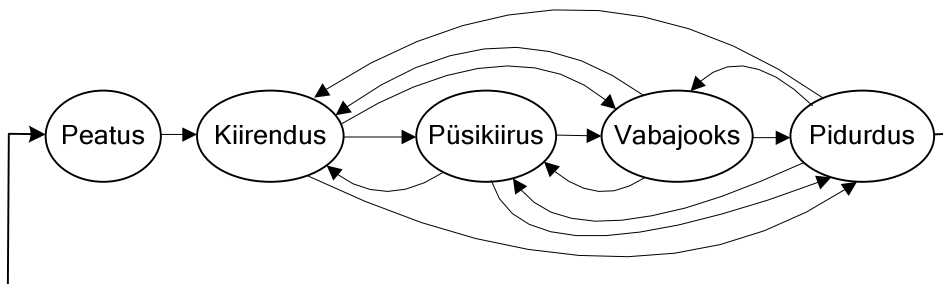
Elektertranspordi energiatõhususe suurendamine on olulisel määral võimalik ka mittetehniliste, st organisatoorsete abinõude rakendamisega. Kuna kogu sõidukipargi ja/või infrastruktuuri moderniseerimine koos kõrgtehnoloogilise aparatuuri kasutuselevõtuga (energiasalvestid, veomuundurid jms) tähendab investoritele märkimisväärseid kulutusi vastuvõetamatu tasuvusajaga, siis

organisatoorsed energiasäästu meetodid võivad anda soovitud majanduslikke tulemusi märksa lühemas ajavahemikus.

Üldjoontes jagunevad ökonoomse sõidustiili meetodid alljärgnevalt [LIN04]:

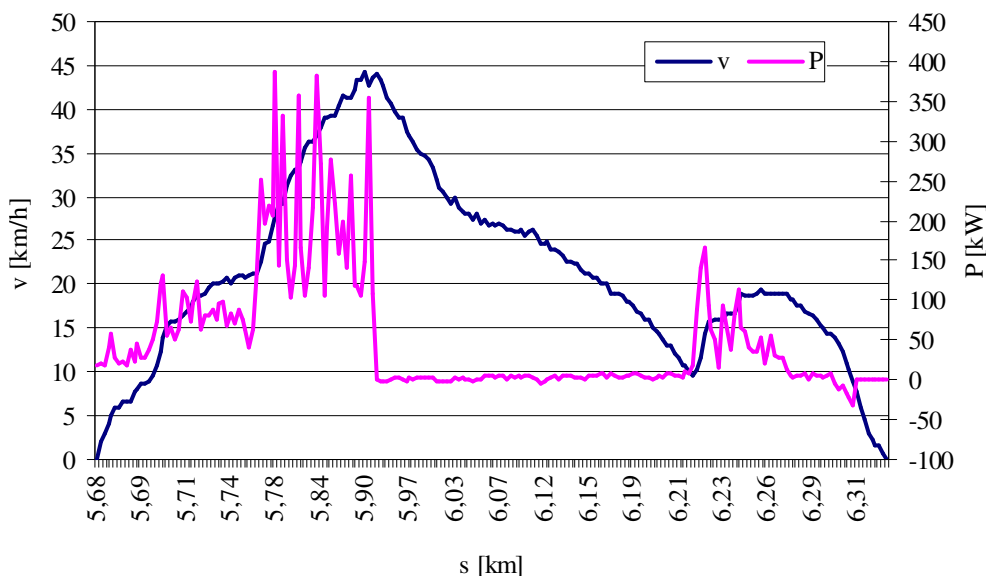
1. Kiiruse piiramine. Maksimaalse kiiruse piiramisel liigub sõiduk madalamal püsikiirusel, säästes kiirendamisele ja takistusjõudude ületamisele kuluva energia arvel. Kuna viimane komponent sõltub kiiruse ruudust, on meetod efektiivne eeskätt kiirliinidel. Allika [GUN05] andmetel on sõiduaja pikendamisel 10 % võrra võimalik saavutada kuni 25 % energiasääst.
2. Kiirenduse piiramine. Sellisel viisil väheneb sõiduki dünaamiline takistusjõud ja seega ka lõppkiiruse saavutamiseks vajalik võimsus. Kuna trammi- ja trollipeatuste vahemaad on lühikesed, on meetod tõhus just linnatranspordis. Kirjanduses [GEN85] väidetakse, et 65 % kogu elekterveol tarbitavast energiast kulutatakse ära kiirenduste jooksul.
3. Vabajooks enne pidurdust. Veojõu vähendamisel nullini enne pidurdusfaasi jõudmist kasutatakse allesjäänud kineetiline energia osaliselt liikumistakistuse ületamiseks. Sõiduk jätkab liikumist ja pidurid rakenduvad hiljem.
4. Kõrgendike ületamine inertsi abil. Kui veojõud viia nullini enne kõrgendiku tippu jõudmist, hakkab sõiduk langusel tänu raskusjõule taas kiirust koguma. Liikumistakistus ületatakse sõiduki potentsiaalse energia abil.
5. Lisakiirendus raskusjõu abiga. Piisava languse korral saab sõiduk raskusjõu mõjul lisakiirenduse, seejuures potentsiaalne energia muutub kineetiliseks.

Sõiduki liikumine kahe punkti vahel jagatakse tavaliselt kolmeks põhifaasiks: kiirenduseks, liikumiseks konstantse kiirusega, vabajooksuks ja pidurduseks (joon 1.25). Ideaalsel juhul läbitakse trajektoori järjestuses peatus-kiirendus-püsikiirus-vabajooks-pidurdus-peatus, mida joon 1.25 ilmestab sirgjooneline suletud kontuur.



Joonis 1.25. Sõiduki võimalikud olekumuutused marsruuti läbides

Reaalses liikluses peab sõiduk kahe peatuse vahel mitmeid kordi kiirendama ja pidurdama lähtuvalt sõidukivälistest teguritest. Reostaatjuhtimisega sõidukite korral puudub konstantse kiiruse faas üldse, mistõttu liikumisel kordub tsükkel kiirendus-vabajooks-kiirendus mitmeid kordi. Energiasäästliku sõidustiili kasutamine sõltub lisaks välistele liiklustingimustele paljuski juhi vilumustest, kuna kasutades impulssjuhtimisega trammil sarnaseid juhtimisvõtteid kui reostaatjuhtimisega korral, st püsikiiruse faasi kasutamata, muutub koormusgraafiku kuju tipuliseks (joon 1.26).



Joonis 1.26. Trammi tegelik liikumistrajektor kahe peatuse vahel

Matemaatilises mõttes tähendab ökonoomse sõidustiili meetod trajektoori optimeerimist nii, et sõiduk püsiks sõiduplaanis minimaalse energiakulu juures. Liikumistrajektor arvutatakse reaajas, kasutades kas iteratsioonimeetodeid [CHE00] [GOL01], geneetilisi algoritme [CHA97], hägusloogikat [BOC07] [SYE07] või kombineeritud lähenemist [BOC07].

1.5.4 Energiasääst liikluse reaajaja juhtimissüsteemide kasutamisega

Meetodi sisuks on reaajas andmehõive vealajaamadest ja sõidukitest ning prioriteetide omistamine lähtuvalt sõiduplaanist ja lubatavast hetkvõimsusest, tihti käsitletakse liikluse reaajaja juhtimissüsteeme koostoimes ökonoomse sõidustiiliga [GUN05] [LIN04]. Taolise haldusliku meetodi kasutamisel [RAW08]:

1. Ei lubata mitme sõiduki üheaegset kiirendamist kontaktliini seksioonil, vähendades sellega vealajaama ülekoormuse ja liigsete pingelangude tõenäosust.
2. Saab koormuse üle kanda teisele, vähem koormatud vealajaamale.
3. Võib juhtida fooride tsüklit nii, et sõiduk saab liikuda peatuste vahel optimaalse trajektooriga.
4. Sõidukile antakse juhtimiskeskusest ette sõiduplaani ja energiasäästu arvestav sobiv hetkkiirus.

Elektertranspordi haldamiseks reaajas peavad kõik hõlmatud komponendid olema sidusühenduses, mis eeldab piisava ribalaiusega andmesidevõrkude kasutamist. Võrgud on füüsiliselt realiseeritud kas GPRS, EDGE, 3G, WLAN või WiMAX tehnoloogiate baasil [ROS04].

Tallinna ühistranspordis kasutatav prioriteedisüsteem [PET05] suunitleti eesmärgiga tagada sõiduplaanist kinnipidamine. Lahendus põhineb fooride kaugjuhtimisel sõiduki kabiinist viisil, et nende tsüklil oleks teatud ulatuses

muudetav sõiduki kiiremaks läbilaskmiseks. Riia linna liiklustingimustele modelleeritud geneetilistel algoritmidel rajanev liikluse haldussüsteem tõi kaasa energia arvutusliku kokkuhoiu tiheda liiklusega lõigul 41 % võrra [GOR08].

1.6 Elektertranspordisüsteemi energiasäästuvõimaluste kokkuvõte

Nagu eelmistes alapunktides kirjeldatud, võib energiasäästu saavutada erinevatel elektertranspordisüsteemi tasanditel: veolajaamades, kontaktliinides ja sõidukitel.

Organisatoorsed energiasäästu meetodid eeldavad liikluse reaalaja juhtimissüsteemi kasutuselevõtmist ja mingil määral ka sõidukijuhtide ümberõpet ebahütlase sõidustiiliga kaasneva täiendava energiakulu minimeerimiseks.

Riistvaralised säästumeetodid nõuavad olemasoleva energiajaotussüsteemi ümberkorraldamist kas

- 1) kahe-suunalise energiavahetuse võimaldamisega veolajaamades,
- 2) veolajaamade paralleeltööga koormuste ühtlustamiseks ning pingelangude vähendamiseks või
- 3) energiasalvestite kasutamise ja pidurdusenergia salvestamiseks ja koormustippude silumiseks.

Kõik liigset energiakulu põhjustavad asjaolud tuleb elimineerida võimalikult lähedal nende tekkekohale, st detsentraliseeritult, et energiavoogude ülekandekulud oleksid minimaalsed. *Tehnika taseme analüüsist lähtuvalt on elektertranspordi energiahalduse parendamise optimaalseimaks meetodiks energiasalvestus, mis lubab teatud ulatuses eraldada energia tootmise tarbimisest.* Salvesti tehnoloogiliselt parim asukoht on sõiduki pardal, optimeerides energiavood tarbija vahetus läheduses. Liini otspunkti ühendatud salvestusalajaamad aitavad kompenseerida kontaktjuhtme takistusest tingitud pingelangudest tulenevaid kadusid ja salvestada pidurdusenergiat. Salvesti paigutamisel veolajaama on võimalik vähendada keskpingevoogust tarbitavat maksimumvõimsust ja salvestada pidurdusenergiat. Elektertranspordisüsteemi energiahalduse üldistatud parendamisvõimalused on kokkuvõtlikult näidatud tabelis 1.9.

Tabel 1.9 Energiahalduse põhilised eesmärgid ja lahendused elektertranspordis

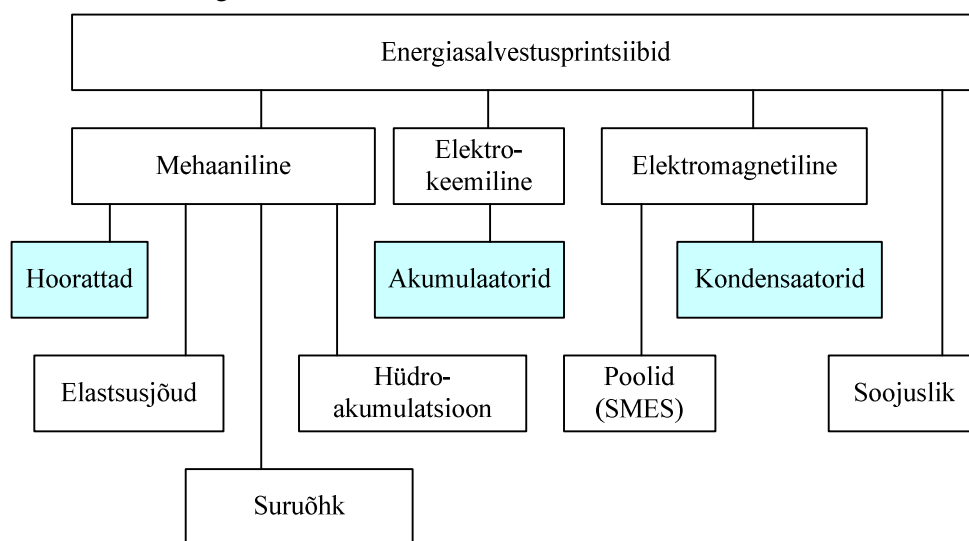
Lahendusviis						
Eesmärk	Organisatoorsed meetmed	Sektsoonide paralleeltoide	Kahe-suunaline veolajaam	Salvesti veo-alajaamas	Salvestus-alajaam	Pardapealne salvesti
Energiasääst	+		+	+	+	++
Pinge stabiliseerimine	+		+	+	+	++
Autonoomne talitus	-		-	-	-	++
Kaarahenduste vältimine	-		-	-	-	++

2 Energiasalvestite liigitus ja analüüs

2.1 Liigitus ja põhiparameetrid

Salvestite kasutamise põhiidee on energia tootmise lahutamine tarbimisest, tagamaks igal ajahetkel tarbijate energiavarustuse minimaalsete tootmis- ja ülekandekuludega. Elektertranspordi kontaktvõrgus, mida toidetakse keskpingevõrgust läbi alaldusalajaamade, on kõikuvaks komponendiks enamasti tarbimine. Sõiduki kontaktliinivabal liikumisel muutub energiatarbimine jaotusvõrgust nulliks ja kõikuv energiavajadus kaetakse täielikult salvestatud energia arvel, sisuliselt on tegemist tootmise ja tarbimise omavahelise ajalise nihutamisega. Rekuperatiivpidurdusel muutub veoajami võimsus negatiivseks, vabanenud energia salvestamine ja taaskasutamine selle hajutamise asemel vähendab kontaktliinist tarbitavat energiat.

Enam kasutatavad salvestusvõimalused on näidatud joon 2.1, millest elektertranspordile sobiv alamhulk on toonitatud taustavärviga. Elektertranspordi energiasalvestite arendustöö on suunatud eeskätt optimaalse erienergia ja erivõimsuse kooskõla saavutamisele, kusjuures on võimalik kasutada ka mitme salvestustehnoloogia sümbioosi [AYA03] [BEN06] [RUF99].



Joonis 2.1. Energiasalvestustehnoloogiate üldliigitus

Olemit ehk entiteeti (hooratas, aku- või kondensaatorpatarei), kuhu energia salvestatakse, nimetatakse *salveks* (SM). Elektertranspordi rakendustel eeldatakse, et salv laetakse elektrienergia abil ja sellest tarbitakse samuti elektrienergiat. Energia muundamiseks ühest liigist teise läheb vaja liideseid, kusuures salve koos muundamiseks ja energiavoogude juhtimiseks vajalike liidestega nimetatakse *salvestiks* (ESU). Teatud juhtumitel võib salve ja toiteliini vaheline liides puududa, nt elektrienergia salvestamisel kondensaatorites ja akupatareides.

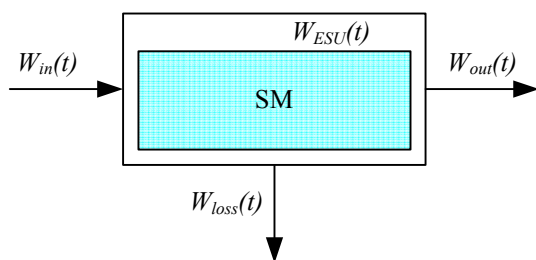
Igat salvestusvõimalust iseloomustavad teatud põhiparameetrid (tabel 2.1), mis võimaldavad neid omavahel võrrelda ja hinnata nende sobivust konkreetse ülesande täitmiseks. Salvesti parameetrid on lisaks salve füüsikalistele piirangutele määratud ka teenindava liidese ehk muunduri näitajatega, seepärast antakse kirjanduses reeglina salvesti kui terviku parameetrid [IAN08] [LHO05].

Tabel 2.1. Energiasalvestite põhiparameetrid [WIT00]

Parameeter	Mõõtühik	Selgitus
Erienergia	W·h/kg J/kg W·h/cm ³ J/cm ³	Kasutatava energia suhe salve või salvesti massi (massienergia) või ruumalasse (mahuenergia).
Mahutavus ehk salvestusvõime	W·h J	Salvestis summaarselt salvestunud või reaalselt kasutatav energiahulk.
Erivõimsus	W/kg W/cm ³	Kasutatava võimsuse suhe massi või ruumalasse.
Eluiga	h	Eluiga ajaühikutes või tsüklites, mis võib olla tsüklite arvust sõltumatu.
Võimsuse gradient	W/s W/min	Võimsuse muutumise kiirus ehk võimsuse muutus ajaühikus.
Kaovõimsus	W	Ajaühiku laadimis-tühjenemiskadude ja abiahelate energiatarvete summa (isetühjenemine).
Pöördusaeg	s min	Aeg, mis jääb energiavahetuse käivitumise ja salvesti tühjenemise vahele 50 %-ni mahutavusest.
Tsüklite arv		Salvesti eluea kestel asetleidvate laadimis-tühjenemistsüklite suurim arv.

2.1.1 Salvesti energiabilanss

Uurides salvesti energiavahetust, on oluliseks mõisteks energiabilanss, mis näitab selle olekut (laadumine, tühjenemine, energiajääk) konkreetsel ajahetkel. Salvesti energiavood on kujutatud joon 2.2.



Joonis 2.2. Salvesti energiabilanss

Kui energiavoog on positiivne $dW_{ESU} / dt > 0$, salvesti laadub, negatiivse energiavoo korral, kui, $dW_{ESU} / dt < 0$, salvesti tühjeneb ja tasakaaluseisundi puhul, kui $dW_{ESU} / dt = 0$, püsib energiajääk muutumatuna. Füüsiliselt on salvesti laadumine ja tühjenemine alati ajaliselt nihutatud, st protsessid ei saa toimuda üheaegselt. Analüütiliselt avaldub energiabilanss kujul [BOD06]

$$\begin{aligned}
W_{ESU}(t) &= W_{ESU}(0) + \int_0^t \left[\frac{dW_{in}(t)}{dt} - \frac{dW_{out}(t)}{dt} - \frac{dW_{loss}(t)}{dt} \right] dt = \\
&= W_{ESU}(0) + \int_0^t [P_{in}(t) - P_{out}(t) - P_{loss}(t)] dt
\end{aligned} \tag{2.1}$$

kus $W_{ESU}(t)$ on salvesti hetkeline energiasalvesti, $W_{ESU}(0)$ salvesti algenergia, $P_{in}(t)$ laadimisvõimsus, $P_{out}(t)$ tühjenemisvõimsus ja $P_{loss}(t)$ kaovõimsus. Bilansi hoidmiseks peab vajalikus ajavahemikus laadimisenergia olema võrdne tühjenemis- ja kaoenergiate summaga.

2.1.2 Laetus- ja tühjenemisaste

Laetusaste SOC näitab energiasalvesti suhtelist energiasalvesti, st energiasalvesti $W_{ESU}(t)$ ja nimimahutavuse $W_{ESU,N}$ suhet. SOC võib mõningatel juhtudel ületada ka 100 %, kuna salved taluvad ka teatud liigkoormust.

$$SOC(t) = \frac{W_{ESU}(t)}{W_{ESU,N}} \cdot 100 \% \tag{2.2}$$

Kuigi SOC teoreetiline miinimumväärtus on 0 %, hoitakse alumist piiri tingituna salvede tehnoloogilisest omapärasest reeglina kõrgemal. Laetusastmete vahemik $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$, kus salvesti täidab temale pandud ülesanded, määrab efektiivse mahutavuse

$$W_{ESU,eff} = W_{ESU,N} \cdot (SOC_{max} - SOC_{min}) \tag{2.3}$$

Tühjenemisastmega DOD iseloomustatakse salvesti nimimahutavusest tarbitud suhtelist energiakogust

$$DOD(t) = \frac{W_{ESU,N} - W_{ESU}(t)}{W_{ESU,N}} \cdot 100 \% = 1 - SOC(t) \tag{2.4}$$

2.1.3 Elektertranspordi salvestitele esitatavad nõuded

Kuna elektertranspordi energiasalvestid on eelkõike ette nähtud dünaamiliste protsesside katmiseks, eeldatakse neilt suurt võimsust, kiiret pöördusaega ja võimsuse gradienti. Mahutavus on määratud dünaamiliste protsesside kestusega, sõiduki autonoomsel liikumisel ka kaetava distantsiga. Energiasalvesti valikul tuleb lähtuda mitmetest kriteeriumitest:

1. Salvesti efektiivne mahutavus ja võimsus peavad vastama määratud ülesandele.
2. Salvesti paigaldamiseks vajalik ruum on piiratud, seda eriti sõiduki pardal.
3. Sõiduki pardale paigutatud salvesti lisamass ei tohi hakata mõjutama sõiduki dünaamilisi omadusi negatiivses suunas.
4. Sõiduki kerekonstruktsioonid peavad suutma taluda salvesti poolt tekitatud mehaanilist lisakoormust.
5. Energiasalvesti peab olema vastuvõetava tasuvusajaga.

Seatud ruumi- ja massipiirangud lubavad eeldada, et elektertranspordis kasutatavad salvestustehnoloogiad peavad omama häid näitajaid massi- ja mahuvõimsuse osas.

2.2 Elektrokeemiline energiasalvestus

Akumulaatorites ehk akudes salvestatakse elektrienergia mitmesuguste ainete elektrokeemilise muundamise abil, mistõttu on need kirjeldatavad kui elektrokeemilised salved (ECSM). Aku liiki valides tuleb tihti leida kompromiss üksteisele vastukäivate nõudmiste vahel, enam levinud kriteeriumiks on täielike laadimis-tühjenemistsüklite arv ning maksumus.

Akude mahutavust väljendatakse ampertundides (A·h), mis saadakse tühjenemisvoolu ja -aja korrutisena, tühjendades akut miinimumklemmipingeni. Nimimahutavus antakse tavaliselt kas 5 h, 10 h või 20 h tühjenemisaja juures. Aku mahutavust mõjutavad 5 põhitegurit:

- 1) mõõtmed: koos mahutavusega kasvab ruumala ja elektrodide pindala;
- 2) temperatuur: jahtudes väheneb aku mahutavus;
- 3) miinimumpinge: mõnedel akutüüpidel võib koormamine allpool miinimumpinget kaasa tuua aku riknemise;
- 4) tühjenemisvool: mida enam akut koormata, seda väiksemaks muutub mahutavus;
- 5) senine ekspluatatsioon: laadimis-tühjenemisvoolu tugevused, tsüklite sagedus, temperatuurivahemikud, aku vanus jne.

Elkirjeldatud mahutavuse sõltuvust koormusvoolust iseloomustatakse nn Peukert'i valemiga [DOE05]:

$$Q(I) = Q_N \cdot \left(\frac{I_N}{I} \right)^{k-1}, \quad (2.5)$$

kus $Q(I)$ on aku mahutavus ampertundides valitud koormusvoolul I , Q_N nimimahutavus nimi-koormusvoolul, I_N nimi-tühjenemisvool ja k nn Peukerti konstant, mis sõltub konkreetsest akutüübist. Siit järeldub, et aku efektiivne mahutavus kahaneb koormuse kasvuga mittelineaarselt.

Kuna üksiku akuelemendi pinge jääb sõltuvalt tüübist vahemikku 1,2 V...4,2 V, ühendatakse nad süsteemi nimipingega ühildamiseks jadamisi patareideks. Paljudest elementidest koosneva akupatarei juures on probleemiks elementide pingete ühtlustamine ja nende seisundi pidev jälgimine, kuna ühe komponendi rike jadaahelas viib rivist välja kogu patarei.

2.2.1 Pliiakud

Plii-happeaku on kõige vanemaks ja levinumaks aku liigiks, mis tänapäevaks on jõudnud oma arengu lõppfaasi. Aku klemmid valmistatakse pliiist, plusslektroodid pliioksiidist ja miinuselektroodid kásnpliiist, elektrolüüdina kasutatakse lahjendatud väävelhapet H_2SO_4 . Tühjenedes muundub elektrodide aktiivaine pliiisulfaadiks, mille tagajärjel elektrolüüdi tihedus väheneb.

Elektersõidukites kasutamist piiravad pliiakude puhul eeskätt väike erivõimsus ja halb vastupidavus elekterveol esinevatele sagedastele suure vooluga tühjenemis-laadimistsüklitele. Pliiaku eluea pikendamise huvides tuleb selle laetusastet hoida väga kitsastes piirides, mis vähendab efektiivset mahutavust veelgi. *Citadis*-tüüpi trammil kasutatakse kuni 22 m vooluvabade lõikude piiratud võimsusega

läbimiseks pliiakusid mahutavusega 9 kW·h [TUT07], mis iseloomustab kujukalt nende ebarahuldavat erivõimsust piisava erienergia juures. Headeks külgedeks on neil soodne maksumus jakerge kättesaadavus, mis võib muuta need atraktiivseks, kui on küllaldast paigaldusruumi.

2.2.2 Nikkel-kaadmiumakud

Nikkel-kaadmiumakud (NiCd) olid kuni täiuslikumate tehnoloogiate ilmumiseni põhilised suurte impulssvõimsuste korral kasutatavad akud tänu suuremale erivõimsusele ja erienergiale võrreldes pliiakudega. Nende puuduseks on nn mälu efekt, mis nõuab täpset laadimise ajastatust: täie mahutavuse saavutamiseks tuleb need eelnevalt täielikult tühjendada ja seejärel laadida väikese, kuni 10 % nimimahutavusele vastava püsivooluga, st nende laadimisvõimsus ehk rekuperatiivenergia vastuvõtuvõime on piiratud. Suure maksumuse ja kaadmiumi mürgisuse tõttu eelistatakse neile viimasel ajal metallhüdriid- ja liitium-ioonakusid.

2.2.3 Nikkel-metallhüdriidakud

Hetkel elektertranspordis enim kasutust leidvate nikkel-metallhüdriidakude (NiMH) positiivne elektrood koosneb nikkelhüdrosiidist ja negatiivne elektrood mitme metalli, nagu vanaadium, titaan ja nikkel, sulamist. Viimase aastakümne jooksul on NiMH tehnoloogia saavutanud oma erienergia ja -võimsuse osas küpsuse. Ehituslikult on NiMH akud orienteeritud kas energia- või tipuvõimsustarbe rahuldamisele. Energiamahukate akude tüüpiline laadimisaeg on 3 h, võimsusakude puhul 1 h, kusjuures 75 % mahutavusest on saavutatav 10 minutiga. NiMH akusid kasutatakse nt Nizzas *Citadis*-tüüpi trammidel autonoomse liikumise tagamiseks [TUT07].

2.2.4 Liitium-ioonakud

Tänu suurele erienergiale ja soodsamale maksumusele eeldatakse, et liitium-ioonakud (LiIo) asendavad elekterveo rakendustes lähitulevikus praegu levinud NiMH tehnoloogia. Aku koosneb koobaltoksiidist valmistatud positiivsest elektroodist, süsinikust negatiivsest elektroodist ja elektrolüüdina toimivast orgaanilises lahuses liitiumisoolast. Võrdlemisi uue tehnoloogia juures tuleb märkida, et akus toimivad protsessid on teiste akutüüpidega võrreldes lihtsamalt kirjeldatavad ja kergemini modelleeritavad [LUC08]. LiIo kasutamise võimalusi on katseliselt uuritud ka trammidel (tabel 2.2).

Tabel 2.2. Trammil kasutatav LiIo akupatarei [OGA07]

Parameeter	Element	Patarei
Nimipinge [V]	3,6	605
Mahutavus [MJ]	0,7	118
Tipuvõimsus [kW]	1,78	300
Autonoomia [km]	17	
Mass [kg]	3,6	605
Eluiga tsüklites ($DOD \leq 10\%$)	10^5	

2.2.5 Liitium-polümeerakud

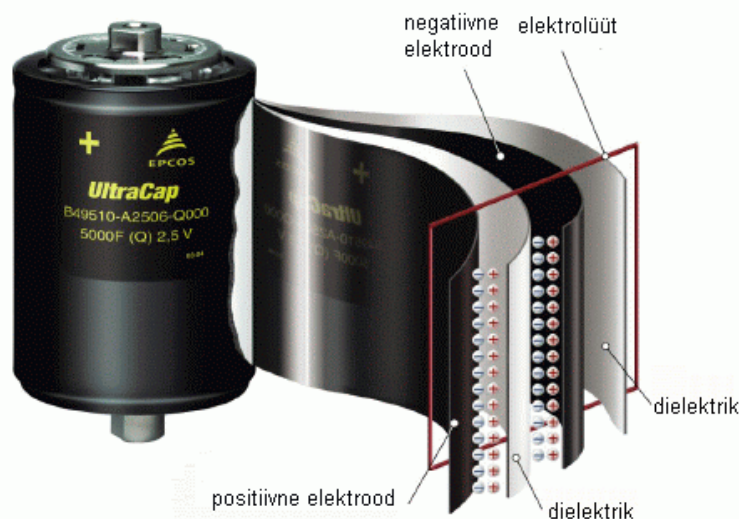
Liitium-polümeerakud (LiPo) sarnanevad ehituslikult LiIo akudele, elektrolüüdiks on neis liitiumheksafluorafosfaadi LiPF_6 orgaaniline lahus. Vaatamata headele näitajatele erienergia osas, on nende puudusteks tundlikkus ülelaadimisele ja liigtühjenemisele ning elektrolüüdi aurustumisele, seda eriti suurtel koormustel. Samuti vajavad need oma funktsionaalsuse säilitamiseks kas sundjahutust või -soojendust. Kirjeldatud puudustele vaatamata hinnatakse nende kasutusvõimalusi elektertranspordis tehnoloogia küpsuse saavutamise järel perspektiivikaks, kuna liitiumipõhiste akude kasutegur võib ulatuda kuni 96 %-ni, teistel akutüüpidel jääb see vahemikku 60 %...70 % [KIM08].

2.3 Elektrilised ja mehaanilised energiasalvestid

Elektrilised ja mehaanilised energiasalvestid, kuhu liigituvad vastavalt ülikondensaatoritel ja hooratastel põhinevad tehnoloogiad, kuuluvad nn kiiretoimeliste salvestite hulka. Salvesti kiiretoimelisuse all tuleb mõista pöördusaja lühidust ja suurt võimsusgradienti (tabel 2.1), st suutelisust endas salvestunud energia võimalikult kiiresti tarbijale üle kanda. Prioriteediks on suur erivõimsus ning vastupidavus sagedastele tühjenemis-laadimistsükklitele, kuna kaetavad energiavajadused on reeglina lühikese kestusega.

2.3.1 Ülikondensaatorid

Ülikondensaatorid (ka super- või kaksikkihtkondensaatorid, joon 2.3) salvestavad energia elektroodi poorsel pinnal moodustunud kaksikkihis. Mahtuvuse erinevuse, võrreldes tavaliste elektrolüüt-kondensaatoritega, põhjustavad aktiivsöe suur efektiivpind – 2000 m^2/g ja vastasmärgiliste laengute äärmiselt väike, 2 nm...5 nm eraldatus (joon 2.3). Elektrolüüdina kasutatakse vähetoksilisi orgaanilisi lahuseid.



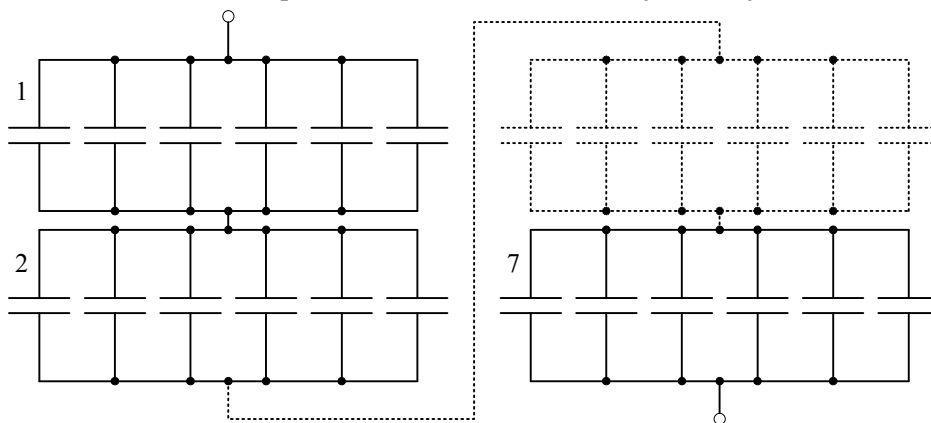
Joonis 2.3. Ülikondensaatori ehitus [EPC06]

Orgaaniliste elektrolüütide läbilöögipinge väärtuseks on ~3,2 V, seetõttu jääb ülikondensaatori suurimaks kasutatavaks pingeks 2,85 V. Eluea pikendamise huvides valitakse tööpingeks kuni 2,7 V, uuringud on suunatud täiuslikemate materjalide otsimisele elektrolüütide ja elektroodide vallas.

Kondensaatori energijääk kindlal ajahetkel $W_C(t)$ on lihtsalt arvatav selle pinge $u_C(t)$ ja mahtuvuse C alusel

$$W_C(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u_C(t)^2 \quad (2.6)$$

Järelikult annab ülikondensaatorite perspektiivne pinge kasv suurema efekti kui suur mahtuvus. Hetkeseisuga on saavutatud ülikondensaatorite mahtuvuseks kuni 5000 F [EPC06]. Laadimis-tühjenemistsükli arv on võrreldes elektrokeemiliste akudega väga suur (>1 000 000), samas nende vananemise intensiivsus sõltub temperatuurist. Pinget, võimsust ja mahtuvust on võimalik tõsta üksikute ülikondensaatorite ühendamisega patareideks. Tootjad valmistavad ka kompleksseid ülikondensaatorimooduleid, mis juba koosnevad jadaühenduses ülikondensaatoritest koos pingeühtlustus- ja jälgimisahelatega. Statsionaarses energiasalvestis *Sitras SES* kasutatav ülikondensaatorpatarei koosneb 25 jadaühenduses moodulist, iga moodul on omakorda jaotatud seitsmeks jadagrupidiks, kuhu kuuluvad kuus rööpühenduses ülikondensaatorit (joon 2.4 ja tabel 2.3).



Joonis 2.4. Sitras SES ülikondensaatorite ühendused patareis [SIE09]

Tabel 2.3. Sitras SES ülikondensaatorpatarei põhinäitajad 600 V võrgupingel [SIE09]

Parameeter	Ülikondensaator	Moodul	Patarei
Nimipinge [V]	2,7	18,9	473
Mahtuvus [F]	3000	2570	103
Tipuvõimsus [kW]			1000
Elementide arv	1	42	1050
Efektiivne mahutavus [kW·h]			1,8

Jättes arvestamata valmistamise tehnoloogiast tingitud mittelineaarsused ja kaod, on kondensaatori laetusaste *SOC* rahuldava täpsusega arvatav sõltuvustest (2.2) ja (2.6). Tulemus näitab, et *SOC* on ruutsõltuvuses suhtelisest pingest:

$$SOC(t) = \frac{\frac{1}{2} \cdot C \cdot u_C(t)^2}{\frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{C,N}^2} \cdot 100 \% = \left(\frac{u_C(t)}{U_{C,N}} \right)^2 \cdot 100 \%, \quad (2.7)$$

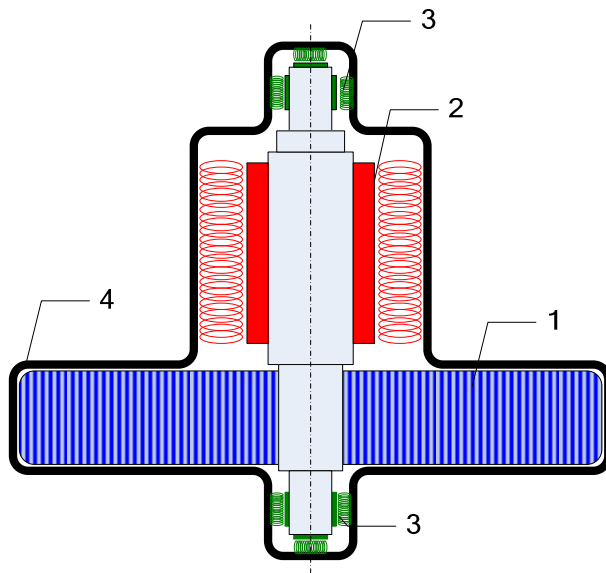
kus U_{CN} on kondensaatori või kondensaatorpatarei nimipinge. Efektiivne mahutavus töötamisel pingevahemikus $U_{C,min} \leq U_c(t) \leq U_{C,N}$, kui $SOC_{max} = 100 \%$

$$W_{C,eff} = \frac{C}{2} \cdot (U_{C,N}^2 - U_{C,min}^2) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{C,N}^2 \cdot (1 - SOC_{min}) \quad (2.8)$$

Järelikult on ülilkondensaatorpatarei efektiivne mahutavus seda suurem, mida rohkem võib muutuda pinge klemmidel, efektiivset mahutavust on võimalik suurendada pinget tõstva ja langetava muunduri kasutamisega. Vajaliku mahtuvuse, pinge ja võimsusega kondensaatorpatarei saab koostada üksikute elementide kombineerimisega jada- ja rööpahelates, kuid puudusena tuleb märkida järjestikühenduse summaarse töökindluse vähenemist.

2.3.2 Hoorattad

Hooratassalvesti moodustub hoorattast ja seda käitavast elektriajamist, mis on ka teenindavaks liideseks. Laadimise käigus muundatakse elektrienergia pöörleva rootori kineetiliseks energiaks, hõõrdekadude vähendamiseks asuvad rootor ja hooratas enamasti vaakumis. Tühjenemisprotsessi käigus jätkub inertsil rootori pöörlemine ja kineetiline energia muundatakse elektrienergia tagasi elektriks. Vaakumisse paigutatud suurekiiruselised hoorattad komplekteeritakse integreeritud elektrimasinaga nagu näidatud joon 2.5 (1-hooratas, 2-elektrimasin, 3-tugilaagrid, 4-õhukindel kest).



Joonis 2.5. Hooratassalve ehitus [WER07]

Hoorattas salvestunud energiahulk ehk kineetiline energia on võrdeline geometriast sõltuva inertsimomendiga J ja ruutvõrdeline nurkkiirusega $\omega(t)$

$$W_{FW}(t) = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega(t)^2 \quad (2.9)$$

Ruutsõltuvuse tõttu osutub nurkkiiruse tõstmine tõhusamaks mahtuvuse tõstmise meetodiks kui inertsimomendi suurendamine. Ometi pole hooratast võimalik kiirendada mis tahes lõppkiiruseni: pöörlemisel viivad kohesioonijõud, mis määravad materjali tugevuse, osakesed oma loomulikult sirgjoonelisel trajektooril ringliikumisele. Ühtlase sirgjoonelise liikumise taastamiseks hakkavad kesktõukejõud hooratast venitama, mis materjali tugevuspääri ületamisel päädib purunemisega. Teras eienenergia ei ületa ka parimatel markidel 30 W·h/kg, kergema titaani puhul on selleks piiriks 40 W·h/kg. Ohutustehnilistel kaalutlustel ja arvestades asjaolu, et tugevusarvutused tehakse alati teatud varuga, pole metalle võimalik ekspuuteerida kriitilise piirini; seega tuleb mahtuvuse edasiseks tõstmiseks otsida alternatiivseid materjale. Heast küljest on end näidanud mitmesugused sünteetilisest vaikudest ja süsinik- või aramiidkiududest koosnevad komposiitmaterjalid, mille eienenergia ületab legeritud terase oma ligi viieteistkordselt (tabel 2.4). Erinevalt terasratastest käituvad komposiidid avariolukorras säästvamalt, purunedes mitte üksikuteks suurteks kildudeks, vaid kiuti paljudeks väikesteks ribadeks. Magnetlaagrite kasutamisega saavutatud suurim pöörlemissagedus on üle 100 000 p/min, kusjuures joonkiirus hooratta välispinnal ületab 1000 m/s, st kolmekordse helikiiruse.

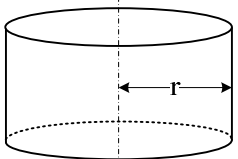
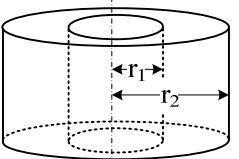
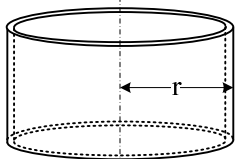
Tabel 2.4. Hooratate konstruktsioonimaterjalid [BUR98] [GEN85]

Materjal	Tõmbetugevus [MPa]	Tihedus [kg/m ³]	Teoreetiline massienergia [W·h/kg]	Teoreetiline mahuenergia [kW·h/m ³]
Legeeritud teras	1300	7800	30	234
Legeeritud titaan	1150	5100	40	204
Klaaskiud	1300	1900	93	177
Süsinikkiud	6300	1550	436	676

Kaasaegsete komposiitmaterjalidest hooratassalvede suured kiirused esitavad ranged nõuded ka laagerdusele. Tavapäraste veere- ja liugelaagrite hõõrdekaod on võrdelised pöörlemiskiirusega, suuritel pöörlemiskiirustel kuumenevad laagrid üle ja riknevad. Õli- ja määrdesisalduse tõttu on neid vaakumis keeruline kasutada. Hõõrdekadudest on sisuliselt vabad magnetlaagrid, kus rootorit toetavad magnetväljad. Voolumatkestuse korral kaob stabiliseeriv magnetväli, seetõttu tuleb tugimagnetite ja rootori kahjustuste vältimiseks näha ette abilaagrid ja -toide. Abilaagritena kasutatakse metallist või keraamilisi veerelaagreid, mis tagavad magnetlaagrite tõrgete korral ohutu seiskamise. Mõned tootjad eelistavad magnetlaagritele sundmäärimisega mehaanilisi laagreid, mille puhul kasutatakse spetsiaalseid vaakumikindlaid sünteetilisi õlisid. Taoliste laagritega toetatud hooratassalvestid on saavutanud pöörlemiskiiruse 25 000 p/min [ROS06].

Kineetilise energia võrrandi (2.9) esimene tegur, inertsimoment sõltub hooratta massist ja geometriast (tabel 2.5). Ilmneb, et suurem mahutavus on võimalik saavutada põhimassi jaotamisega hooratta perimeetrile.

Tabel 2.5. Hooratta inertsimomendi sõltuvus geometriast [GEN85]

		
Massiivne silinder	Õhukeste seintega avatud otstega silinder	Õõnes silinder
$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$	$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_1^2 + r_2^2)$	$J = m \cdot r^2$

Hooratassalvesti laetusastme leidmine on analoogne ülikondensaatori omaga:

$$SOC(t) = \frac{\frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega(t)^2}{\frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_N^2} \cdot 100 \% = \left(\frac{\omega(t)}{\omega_N} \right)^2 \cdot 100 \% , \quad (2.10)$$

kus ω_N on hooratta konstruktsiooniline nimikiirus. Hooratta efektiivne mahutavus töötamisel kiiruste vahemikus $\omega_{min} \leq \omega(t) \leq \omega_N$, kui $SOC_{max} = 100 \%$

$$W_{FW,eff} = \frac{J}{2} \cdot (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{max}^2 \cdot (1 - SOC_{min}) \quad (2.11)$$

Sõiduki pardapealsete hooratassalvestite puhul kerkib esile kiirest pöörlemisest tingitud güroskoopiliste jõudude tasakaalustamise probleem [POS96] [PUL06], mille kompenseerimiseks kasutatakse kardaanriputust. Elektertranspordis praktilist kasutust leidnud hooratassalvestite näited on toodud tabelis 2.6.

Tabel 2.6. Hooratassalvestid elektertranspordis [REI01] [ROS06] [ULE05] [HOC07]

	Magnet-Motor	Rosseta	CCM	Piller
Tüübitähis	MDS K3	T2	ULEV-TAP2	UKOZ
Nimikiirus [p/min]	12 000	25 000	22 000	3300
Efektiivne mahutavus [kW·h]	2,0	4,0	4,0	5,0
Tipuvõimsus [kW]	150	1000	300	1000
Gabariidid Ø x h [mm]	660 x 640	965 x 1200	780 x 450	980 x 1500
Salve mass [kg]	400	650	375	1800
Hooratta materjal	süsinikkiud			teras
Asukoht	pardapealne	statsioonarne	pardapealne	statsioonarne

Hooratassalvesti võimsus sõltub ainult liideseks oleva elektriajami mehaanilisest ja elektrilisest läbilaskevõimest. Vahetult hoorattaga mehaaniliselt

ühendatud elektrimasin peab laadimise ajal töötama mootori- ja tühjenemise vältel generaatoritalitluses, olema võimalikult väikeste kadudega ja töökindel ning taluma tsüklilist lühiajalist ülekoormust. Põhiliselt leiavad salvestites kasutust ehituslikult sarnased, kuid erineva juhtimisviisiga püsिमagnetergutusega sünkroonmasinad [CHA07] [ULE05] [WER07] ja kommutaatorita alalisvoolumasinad [JUN04] [SIO08]. Katseeksemplarides on kontrollitud ka lülitatavate reluktantsmasinate (SRM) sobivust [BIN03] [LAF05]. Tagamaks liimitud püsिमagnetite vastupidavust kesktõukejõududele, kasutatakse mõnedes salvestites ka nn välise rootori lahendust, kus mähistega staator paikneb hooratta paigalseisval teljel [WER07].

Hoorattasalvestite põhipuuduseks tuleb lugeda kineetilise energiasalvestuse põhimõtet ennast, kuna kogu kaasaegne energiatehnoloogia on suunatud pöörlevate komponentide asendamisele staatilistega. Elektromehaaniline muundamine on seotud lisakadudega magnetahelates ja nõuab keerukamaid liideseid, tõrgete põhjusteks on peamiselt rikked jahutus- ja õlitussüsteemides, st hooratassalve toetavates abiahelates [ROS06].

2.4 Energiasalvede võrdlev analüüs

Vaadeldud salvestustehnoloogiaid on võrreldud tabelis 2.7, kust võib välja lugeda, et suurima erivõimsusega on praeguse tehnika taseme juures ülikondensaatorid ja suurima erienergiaga LiPo akud. Pliiakude ainus tugevus seisneb nende soodsamas maksumuses võrreldes ülejäänud energiasalvedega, nende kasutamine elektertranspordis väheneb pidevalt. Sõiduautode puhul, kus esmatähtsad on pikk laadimistevaheline vahemaa ja lühike laadimisaeg, omavad perspektiivi liitiumi baasil valmistatud akupatareid, mille kasutamine trollides, kergrööbastranspordis ja elektrirongides on hetkel väheatraktiivne suure maksumuse tõttu. Tehnoloogia küpsedes ja hindade alanedes võivad kontaktliiniga seotud sõidukitel autonoomse liikumise tagamisel hakata liitiumakud tõsiselt konkureerima ülikondensaatoritega, mis samal mahutavusel on tunduvalt suuremate gabariitidega.

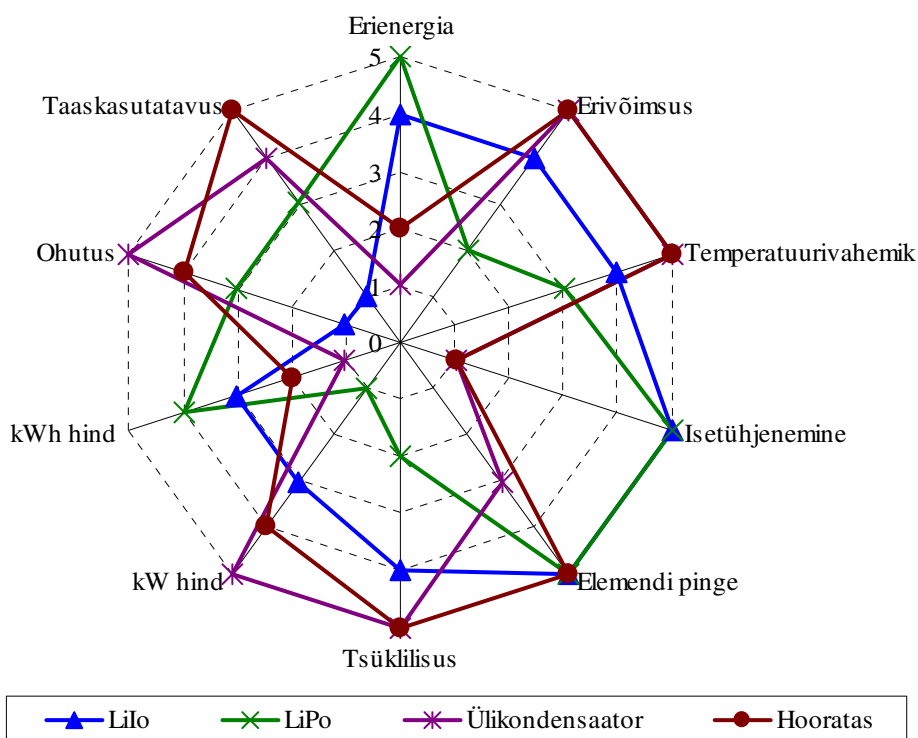
Tabel 2.7. Energiasalvede energeetiliste näitajate võrdlus [KIM08] [ULE05] [SAF08]

Tehnoloogia	Massenergia [W·h/kg]	Mahuenergia [W·h/l]	Massivõimsus [W/kg]	Mahuvõimsus [W/l]
Pliiaku	30	74	100	250
NiMH energiaaku	66	137	150	310
NiMH võimsusaku	50	90	520	970
LiIo aku	75	139	1100	2040
LiPo aku	135	350	200	520
Ülikondensaator	5,5	6,4	7500	8700
Hooratas	10	17,8	800	1420

Energiasalvestustehnoloogiate võrdluseks kasutatakse laialdaselt ka nn Ragone'i diagramme, kus telgedeks on erivõimsus ja -energia, kusjuures iga tehnoloogiat iseloomustatakse kumbagi piirkonda väljendava ristkülikuga [CHR00] [ESA07]. Energiasalvede maksumus muutub pidevalt seoses turu arenguga, lisaks soetushinnale tuleb arvestada ka nende eluea jooksul tehtavate kulutuste ja utiliseerimisega kasutusaja lõppemisel, st kumulatiivse maksumusega; seetõttu

loetakse täpsemaks majanduslikuks kriteeriumiks laadimis-tühjenemistsükli hinda [ESA07] [ROS06].

Energiasalvestustehnoloogiate hetkeseisu kvalitatiivse ülevaate annab joon 2.6, kus iga vaadeldavat omadust hinnatakse 5-pallisel skaalal. Ülikondensaatorid ja hoorattad taluvad paremini miinustemperatuure, st nende parameetrid temperatuuri langedes kuigivõrd ei halvene. Tsüklilisus ehk eluiga laadimis-tühjenemistsüklites muudab nende kumulatiivse maksumuse akude omast soodsamaks. Võib eeldada, et lähiaastatel jäävad kontaktliiniga seotud sõidukitel, arvestades teemat käsitlevate teadusartiklite arvu, prevaleerima ülikondensaatorid, kuid tehnoloogia paranemisega tsüklilisuse osas ja maksumuse langemisega võivad huvipakkuvateks osutada ka liitiumipõhised akud.



Joonis 2.6. Energiasalvestustehnoloogiate võrdlev võrkdiagramm [LUC08] [SAF08]

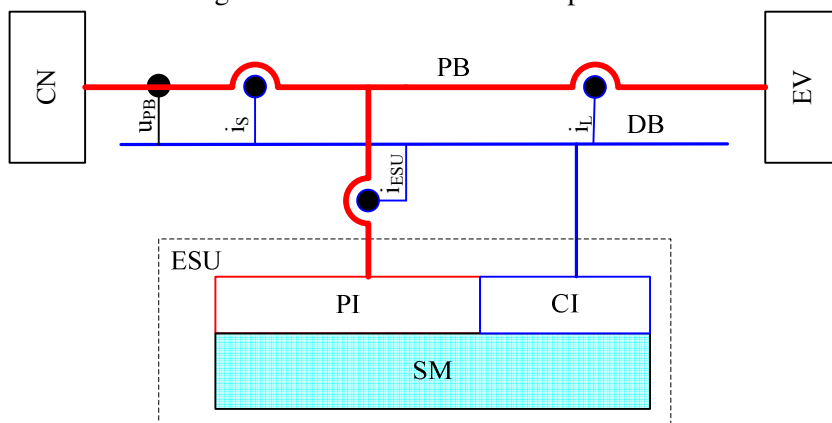
Energiasalveste maksumus muutub pidevalt koos tehnoloogia küpsemise ja turu arenguga, ligikaudne võrdlus on toodud allikas [ESA07]. Ülevaateartiklitest [HOC07] [ROS06] võib eeldada, et esialgu omavad hoorattad samade põhinäitajate juures ülikondensaatorite ees teatud hinnaeelisid.

3 Energiasalvestite topoloogiad, mudelid ja juhtimine

3.1 Salvesti liideste üldstruktuur ja ülesanded

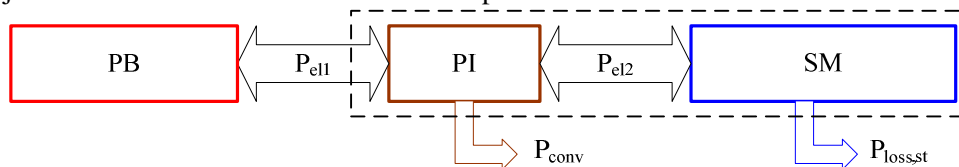
Energiasalvestit ESU teenindava liidese ülesandeks on korraldada energia- ja andmevahetust salve SM, kontaktvõrgu CN ja sõidukitel EV paiknevate tarbijate vahel, olles ühenduses nii energia- kui ka andmesüüridega (joon 3.1, tähised vastavalt PB ja DB) [JOL04]. Salv on seotud kumbagi siiniga jõuliidese PI ja juhtimisliidese CI kaudu, energiavahetust reguleeritakse anduritelt saadud signaalide põhjal (energiasüüri pinge u_{PB} , koormusvool i_L , toitesüsteemist tarvitav vool i_S ja salvesti vool i_{ESU} jne) vastavalt juhtseadmes defineeritud eeskirjale.

Energiasüüri omab ühenduspunkti toitesüsteemiga, mille all tuleb kontaktliiniga seotud elektertranspordi kontekstis mõista veoalajaamades paiknevate salvestite korral alaldite väljundit, salvestusalajaamade ja pardapealse salvesti korral kontaktvõrku, toitesüsteemi koormuseks on vastavalt kas kõik käsitletava veo- või salvestusalajaama teeninduspiirkonnas viibivad sõidukid või sõiduki veoajam, mille võimsus kõigub vastavalt sõiduki liikumisparameetritele.



Joonis 3.1. Energia- ja andmevood salvestiga elektripaigaldises

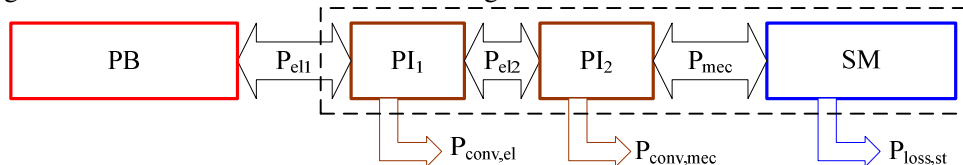
Jõuliides peab võimaldama kahe-suunalist energiavahetust, st energia tarbimist või tootmist. Üheastmelise muunduse korral reguleeritakse ainult elektrilisi parameetreid (joon 3.2), mille käigus elektriline sisendvõimsus P_{el1} muundatakse elektriliseks väljundvõimsuseks P_{el2} , seejuures esinevad kaod nii muundusprotsessi käigus ($P_{loss,conv}$) kui ka salves endas ($P_{loss,st}$), viimased on tingitud isetühjenemisest ja salves toimivate keemilis-füüsikaliste protsesside iseärasustest.



Joonis 3.2. Üheastmeline energiamuundusprotsess

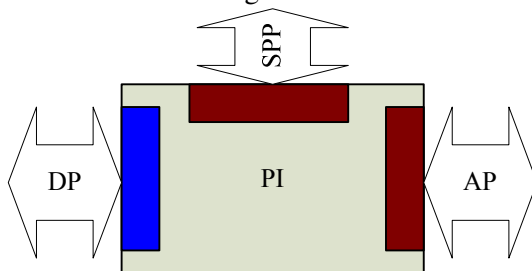
Jõuliidese lisaülesandeks võib olla muundada energiat ühest liigist teise, nagu hooratassalvesti puhul (joon 3.3), kus elektrienergia muundatakse kineetiliseks ja vastupidi. Viimasel juhul võib rääkida mitmeastmelisest liidesest, kus esimeses jõuliidese astmes PI_1 toimub elektriline ja teises astmes PI_2 elektromehaaniline energiamuundus, lõpptulemusena energiasiinilt tarbitav võimsus P_{el1} muundatakse mehaaniliseks võimsuseks P_{mec} hooratta võllil. Kaheastmelise muundusega kaasnev kaovõimsus moodustub elektrilise muunduse kao $P_{conv,el}$ ja elektromehaanilise kao $P_{conv,mec}$ summast.

Hooratassalvesti kaheastmeline liides on kirjeldatav elektriajamina, mille muundur moodustab esimese ja elektrimasin teise astme. Mootoritalitluses töötava elektriajama staatiline koormus on määratud ainult mehaaniliste kadudega, generaatoritalitluses on koormuseks energiasiini antav võimsus.



Joonis 3.3. Kaheastmeline energiamuundusprotsess hooratassalvestis

Tehnoloogiliselt on üheaastmelised jõuliideseid või kaheastmeliste jõuliideste esimesed astmed lahendatud jõuelektronikavahendite baasil, seetõttu võib neid kirjeldada ka kui energiasalvesteid teenindavaid muundureid. Juhtimisliides peab reguleerima energiavoogude suunda ja intensiivsust, st jaotama võimsust toitesüsteemi ja salvesti vahel. Selle sisenditeks on anduritega mõõdetud voolude, pinge ja laetusastme väärtused, väljunditeks jõuliidesele edastatavad reguleerimissignaaliid. Kompaktsete pooljuhtseadmete puhul moodustavad jõu- ja juhtimisliides ühtse terviku (joon 3.4), mis hõlmab sisendväratit SPP ja muundatud energia ehk rakendusväratit AP. Energia muundamine toimub juhtvärati DP kaudu edastatud andmevoogude alusel.



Joonis 3.4. Jõuliidese definitsioon [MIL96]

Sisendväratit SPP iseloomustavad toite parameetrid pinge ja voolu väärtuste ning nende lubatava kõikumise näol, rakendusvärati AP konfiguratsiooni määravad salvesti liik (hooratas, aku- või ülikondensaatorpatarei), salvesti energiavoogude reguleerimise viis (nt PWM või kahepunktireguleerimine) ning pooljuhtide lülitamise tüüp (sujuv või otsene). Juhtvärati DP kaudu liiguvad reguleerimis-, oleku- ja veasignaaliid [MIL96].

3.2 Aku- ja ülikondensaatorpatareide jõuliidesed

Kui energiasiooni pingel lubatakse kõikuda energiavahetust võimaldavas piisavalt suures vahemikus, võib aku- või ülikondensaatorsalve ja energiasiooni vaheline jõuliides ka puududa, kuid taolisel lahendusel on mitmeid tõsiseid puudusi:

1. Patarei peab olema arvestatud kõrgeimale ajutisele liinipingele, mis trammide ja trollide puhul on 800 V ja elektrirongidel 3900 V (tabel 1.1).
2. Patarei miinimumpinge ei tohi töö käigus langeda alla liini madalaima lubatud kestevpinge, seetõttu on efektiivne mahutavus nt trammi puhul kõigest 31 % maksimumist, arvatuna tabeli 1.1 ja valemi (2.8) alusel; pingevahemiku kitsendamine vähendab efektiivset mahutavust veelgi.
3. Laadimis- ja tühjenemisvoolud pole reguleeritavad. Voolu võib astmeliselt reguleerida ja piirata šunditavate takistitega, mis põhjustab kadusid.

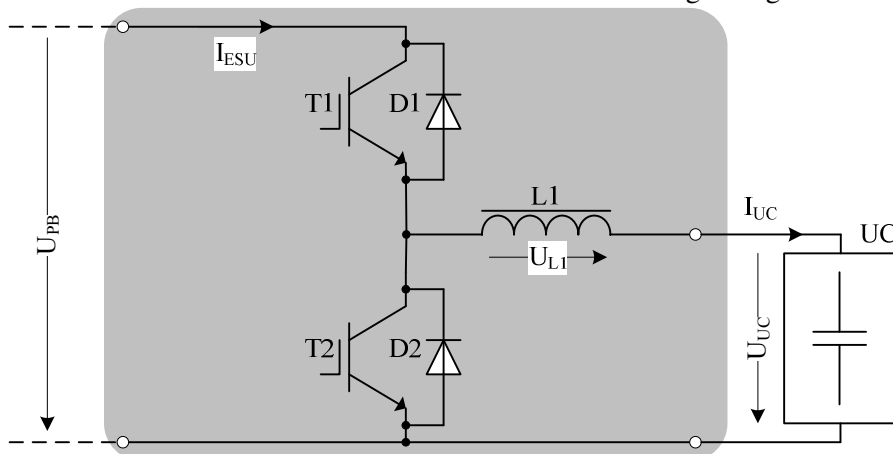
Kirjeldatud puudused on kõrvaldatavad energiavahetust reguleeriva liidese kasutuselevõttuga. Kuna vaadeldavates veovõrkudes kasutatakse alalispinget, on aku- või ülikondensaatorpatarei jõuliidese olulisimaks osaks alalisvoolumuundur.

Alljärgnevalt käsitletakse ülikondensaatorsalvedele sobivaid lahendusi, mis jõuliideste sarnase struktuuri tõttu on kohandatavad ka elektrokeemilistele akudele.

3.2.1 Vahetult energiasiinile ühendatav langetus-tõstemuundur

Võimaldamaks ülikondensaatorpatarei energiavahetust võimalikult ulatuslikus pingevahemikus, peab kasutatav kahesuunaline muundur suutma reguleerida pinget nii all- kui ka ülespoole sisendväärtust. Sobiva muunduri jõuosa topoloogia on kujutatud joon 3.5, kus U_{PB} on energiasiooni ja U_{UC} ülikondensaatorpatarei pinge, I_{ESU} ja I_{UC} vastavalt salvesti ja ülikondensaatorpatarei voolud, T1 ja T2 transistorlülitid, D1 ja D2 vabavooludiodid L1 magnetvälja energiat salvestav induktiivpool ja UC ülikondensaatorpatarei ehk -salv.

Langetus-tõstemuunduri kasutamisel lubatakse ülikondensaatorpatarei pingel kõikuda enamasti vahemikus $(0,5...1,0) \cdot U_{UCN}$, mis vastavalt seosele (2.8) võimaldab efektiivselt kasutada kuni 75 % salvestunud koguenergiast.

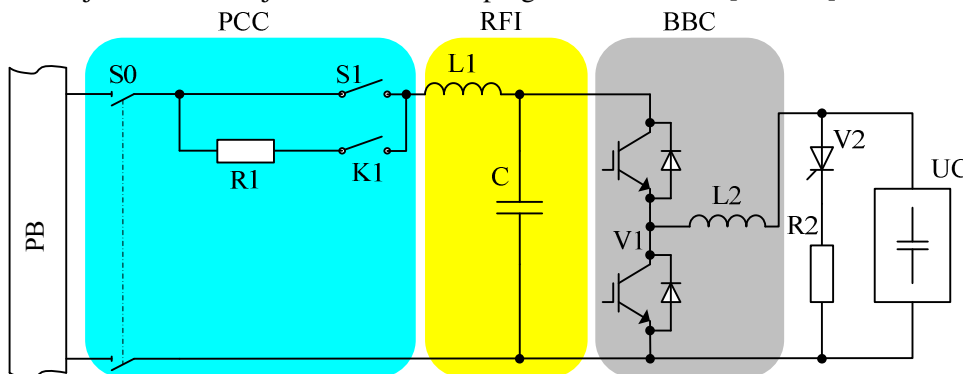


Joonis 3.5. Ülikondensaatorpatareid teenindava langetus-tõstemuunduri skeem

Voolukontuurid moodustuvad vastavalt salvesti seisundile:

1. Laadimise ajal T1 sulgemisel liigub vool mööda kontuuri T1–L1–UC. T1 avamisel kommuteeritakse vool ümber vabavooludiodile D2, kusjuures poolis salvestunud magnetvälja energia muundub elektrivälja energiaks ülikondensaatorpatareis UC. Moodustub kontuur PB–L1–UC–D2. D1 ja T2 hoitakse mittejuhtivas olekus, skeem töötab pingelangetusrežiimis.
2. Energiavoo suuna muutmiseks viiakse skeem üle pingetõsterežiimi. T2 sulgemisel tekib kontuur UC–L1–T2, osa ülikondensaatorpatarei elektrivälja energiast muundub magnetvälja energiaks ja pinge induktiivpoolil hakkab kiiresti kasvama. Kui $U_{L1} + U_{UC} > U_{PB}$, siis T2 avamisel kommuteeritakse vool vabavooludiodile D1, moodustub kontuur UC–L1–D1–PB ja võimsuse märk muutub negatiivseks, st salvesti tühjeneb energiasiinile.

Vabavooludiod D1 muundab salve tühjenemise U_{PB} järsul langemisel alla kondensaatorpatarei klemmpinget juhitamatuks, selline olukord võib esineda ka energiasiini lühise korral; seetõttu on energiasiiniga ühendamiseks vaja lisaks langetus-tõstemuundurile ka täiendavaid sisendahelaid kaitseaparatuuri ja filtrite näol. Näitena võib tuua firma *Siemens* statsionaarse ülikondensaatorsalvesti *Sitras SES* (joon 3.6), mille sisendosa PCC sisaldab lahkülilit S0, kaitselülit S1 ja kontaktorit K1, mille abil lülitatakse sisse kondensaatorist C ja drosselist L1 koosneva filtri RFI laadetakisti R1. Energiavahetust ülikondensaatorpatareiga reguleeritakse langetus-tõstemuunduri BBC poolsilla V1 kaudu. Lisaks on salvesti varustatud ka türistoriga V2 juhitava tühjendustakistiga. See ahel on vajalik ülikondensaatorpatarei tühjendamiseks hooldustööde käigus. Kondensaatorpatarei nimipinge $U_{UC,N} = 473$ V on valitud kontakivõrgu nimipingest 600 V väiksem, mis väldib juhitamatut tühjenemist madalate pingelohkude korral [HAL02].



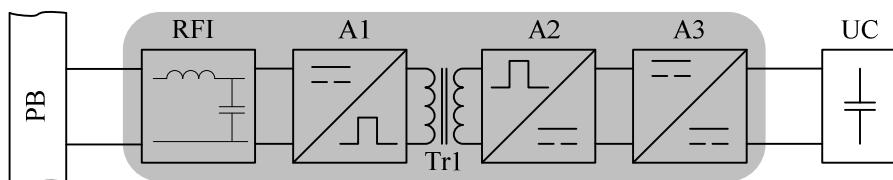
Joonis 3.6. Sitras SES ülikondensaatorsalvesti koos sisendahelatega [HAL02]

3.2.2 Vahelduvvoolu vahelüliliga ülikondensaatorsalvesti

Energiasiini ja ülikondensaatorpatarei sobitamiseks suure pingete erinevuse korral ei piisa enam tavapärasest langetus-tõstemuundurist, vaid ahelasse tuleb lisada vahelduvvoolu vahelüli (joon 3.7), mis koosneb sisendfiltrist RFI, kahesuunalistest impulssmuunduritest A1, A2, kõrgsagedustrafost Tr1 ja tühjenemisel toimivast tõstemuundurist A3 [LIR05] [NOW04]. Kasutatakse ühe- ja kolmefaasilisi

vahelülisid, kusjuures suurtel võimsustel eelistatakse just viimaseid väiksema pooljuhtide koormuse ja parema trafo kasutusteguri tõttu [VIN06]. Kõrgsagedustrafo kasutamisega on tagatud ka jõuliidese sisendi ja väljundi galvaaniline eraldatus.

Võrreldes vahetult energiasiinile ühendatava langetus-tõstemuunduriga, võimaldab vahelduvvoolu vahelüliliga jõuliides valida väiksemast jadaelementide arvust koosneva ülikondensaatorpatarei, millega võib vähendada üksikute elementide pingehütlustusega seonduvaid raskusi. Skeemi puudusteks on suurem pooljuhtide ning magnetahelate arv, millega kaasnevad lisakaod ja keerukam juhtimine, sama võimsuse ülekandmisel madalama pinge juures suureneb ülikondensaatorpatarei laadimis- ja tühjenemisvool, mistõttu juhid tuleb valida suurema ristlõikega, ka suurenevad parasiitakistustest tingitud kaod.



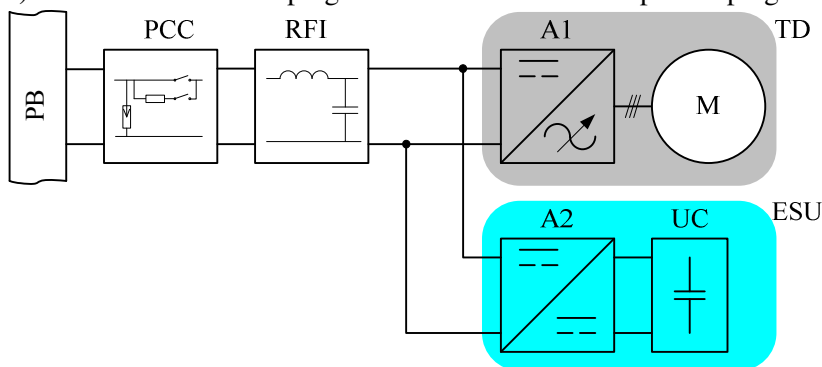
Joonis 3.7. Ülikondensaatorpatarei jõuliides vahelduvvoolu vahelüliliga [VIN06]

3.2.3 Energiasiini, salvesti ja koormuse rööpühendus

Veolajaamades ühendatakse salvesti rööbiti alalisvoolulattidele (joon 1.12), salvestusalajaamades kontaktliinile (joon 1.19) ja pardapealsete lahenduste korral veomuunduri sisendahelasse (joon 3.8). Viimasel joonisel tähistab A1 veoajami TD muundurit ja A2 kondensaatorpatarei jõuliidest.

Taolise struktuurse lahenduse headeks külgedeks on järgmised asjaolud [NAP99]:

- 1) ülikondensaatorpatareid saab laadida nii kontaktvõrgust tarbitava kui ka pidurdusenergiaga;
- 2) energiasalvesti on kiiretoimeliseks aktiivfiltriks, kompenseerides siirdeprotsessidest põhjustatud toiteliini pingekõikumisi;
- 3) veomuunduri sisendpinge ei sõltu ülikondensaatorpatarei pingest U_{UC} ;



Joonis 3.8. Pardapealne ülikondensaatorsalvesti rööpühendus [JOL04]

Puuduseks on, et alalispingemuundur A2 peab olema piisavalt võimas katmaks dünaamilist koormust. Hoidmaks etteantud võimsust, peab ülikondensaatorpatarei vool tühjenedes kasvama. Eeldades energiasiini pinge püsimist konstantsena, on energiasalvesti ESU reguleerimisparameetriks vool, st rööpset energiasalvestit saab käsitleda juhitava vooluallikana [REI06].

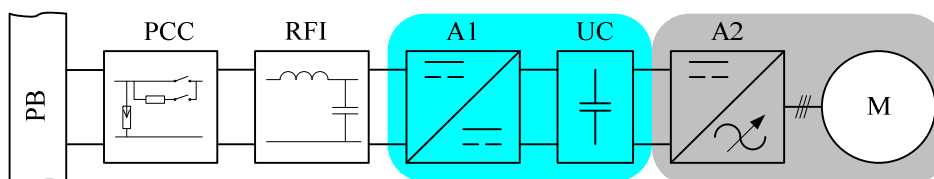
3.2.4 Energiasiini, salvesti ja koormuse kaskaadühendus

Kui rööpstruktuur ei eelda olemasolevate elektripaigaldiste ümberehitisi, siis uute veoajamite loomisel või olemasolevate rekonstrueerimisel tulevad kõne alla ka kaskaadühenduses salvestid (joon 3.9), kus ülikondensaatorpatarei klemmpinge on ühtlasi veoajami toitepingeks. Kaskaadühendusel on mitmeid positiivseid omadusi:

1. Sisendmuundur A1 võimaldab väga täpselt juhtida kontaktliinist tarbitava võimsuse väärtust, nii et see on täiesti ühtlane, sõltumata veoajami talitlusest. Kui eeldada, et salvesti suudab vastu võtta kogu pidurdusenergia, piisab ühesuunalisest muundurist, ülemäärase energia tagastamiseks kontaktvõrku peab muundur A1 võimaldama kahe-suunalist talitlust.
2. Sõiduki talitus on võimalik erinevatel toitepingetel, nt perspektiivne üleminek 750 V liinipingele ei eelda veoajami väljavahetamist.
3. Ülikondensaatorpatareid UC saab laadida nii kontaktliinist kui ka veoajami rekuperatiivpidurdusega.
4. Ülikondensaatorpatarei liideseks oleva alalispingemuunduri A1 võimsus võib olla väiksem kui rööpstruktuuri korral, sest läbi tuleb lasta ainult keskmist ehk püsitalitluse võimsust.
5. Toitesüsteemi sisendelemendid, eellaadimisahel PCC ja filter RFI, talitlevad võimsuse piiramiliselt tunduvalt väiksemate vooludega, mis vähendab neil hajuvat kaovõimsust ja muudab maksumuse soodsamaks.

Kaskaadisel skeemilahendusel on rööpstruktuuriga võrreldes kaks põhipuudust:

1. Kahekordne muundusprotsess ja kasvanud elementide arv jadaahelas toovad kaasa lisakaod ja mõningase töökindluse vähenemise.
2. Veomuunduri A2 sisendpinge kõigub koos ülikondensaatorpatarei klemmpingega. Nõutava funktsionaalsuse tagamiseks peab veoajam olema võimeline talitlema suures sisendpingete vahemikus.



Joonis 3.9. Energiasiini, ülikondensaatorsalvesti ja veoajami kaskaadühendus [NAP99]

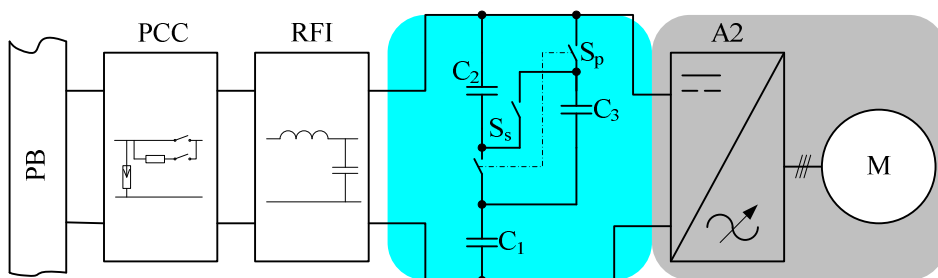
Asünkroonsete veoajamite kasutamisel (joon 3.9) toimib salvesti rahuldavalt madalatel kiirustel, nt paigaltvõtul, kui veoajami reguleerimistunnusjoon eeldab nagunii madaldatud pinget ja sagedust [KOE05], samuti toimub madaldatud pingel ka alalisvoolu veomootorite käivitamine. Veomuunduri sisendpinge stabiliseerimiseks on võimalik selle toiteklemmide ja ülikondensaatorpatarei vahele

paigutada täiendav pinget tõstev muundur, taoline abinõu muudab skeemi keerukamaks ja põhjustab lisakadusid.

Kaskaadses jadastruktuuris reguleeritakse veoajami võimsust etteantud voolul toitepinge muutmisega, seega võib kaskaadühenduses energiasalvestit käsitleda juhitava pingesallikana [REI06].

Lihtsamas lahenduses on kaskaadühenduses ülikondensaatorpatarei energiavood reguleeritavad astmeliselt kontaktoraparatuuri abil, kui pingemuutust klemmidel kompenseeritakse moodulite jada-rööp ümberlülitusega [TAK02]. Taolise skeemilahenduse näide on toodud joon 3.10. Patarei on moodustatud moodulitest C_1 , C_2 ja C_3 . Kiirendamise alguses on lüliti S_p suletud ja S_s avatud ning C_2 ja C_3 on rööpühenduses, samas eraldatakse kogu sõiduki energiasiin kontaktvõrgust. Kui tühjenemisel pinge langeb, avatakse üheaegselt S_p ja suletakse S_s , kõik kolm moodulit satuvad jadaühendusse ning patarei klemmipinge kasvab hüppeliselt, muutes energiavahetuse taas võimalikuks; jadapatarei laetusastme edasisel langemisel lülitatakse taas sisse sõiduki peakontaktor ja sõiduk saab taas toite kontaktliinist. Laadimine toimub vastupidises järjekorras, kui vastavalt patarei klemmipinge kasvule lülitatakse moodulid jadast paralleeli.

Taolise astmelise reguleerimisviisi peamiseks puuduseks on veomuunduri sisendpinge järsud hüpped, millega kaasnevad ka liigvooluimpulsid. Viimaste piiramiseks on vaja kasutada täiendavaid summutusahelaid või suurendada reguleerimisastmete arvu [TAK02].



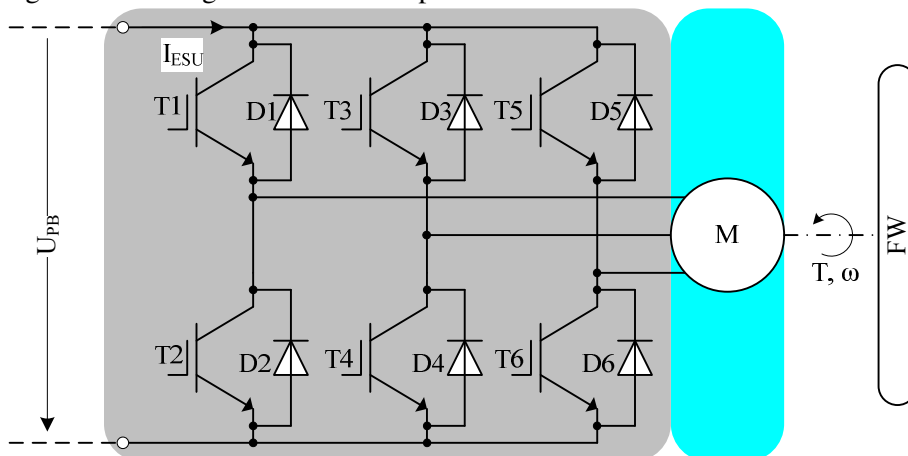
Joonis 3.10. Kaskaadne ülikondensaatorpatarei jada-rööp ümberlülitusega [TAK02]

3.3 Hooratassalvesti jõuliides

Hooratast ja energiasiin siduvaks jõuliideseks on elektriajam, kus laadimise käigus muundatakse elektrienergia kineetiliseks energiaks, tühjenemisel toimub protsess vastupidises suunas (joon 3.3). Mehaanilise salvestusviisi tõttu on hooratassalvesti puhul ainuvõimalik rööpühendus energiasiiniga.

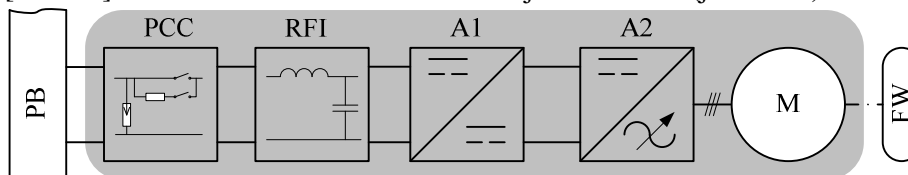
Hoorattaajami elektrimasinana kasutatakse tööstuslikes rakenduses ülekaalukalt püsिमagnetergutusega sünkroonmasinaid [CHA07] [ULE05] [WER07]. Salvesti mitmefaasilise vahelduvvoolumasina ühendamiseks alalisvoolu-energiasiiniga läheb vaja vaheldeid (joon 3.11). Energiasiinist tarbitav elektriline võimsus $P_{el} = U_{PB} \cdot I_{ESU}$ muundatakse mehaaniliseks võimsuseks $P_{mec} = T \cdot \omega$ hooratta FW völliil. Vaheldi koosneb transistorlülititest T1...T6 ja vabavooludiodidest D1...D6.

Energiat salvestades töötab hoorattaajam mootoritalitluses, salvesti vool $I_{ESU} > 0$ ja ajami moment $T > 0$. Energiavoo suuna muutmiseks, st salvesti tühjendamiseks vähendatakse vaheldi väljundsagedust. Väiksemale pöörlemiskiirusele üle minnes muutub ajami kiirendus ja dünaamiline moment negatiivseks, kuna staatorimähise pinge ületab reguleerimiskarakteristikuga etteantud seadesuuruse, toimub energia tagastamine energiasiinile ehk rekuperatsioon.



Joonis 3.11. Hooratassalvesti vaheldi skeem

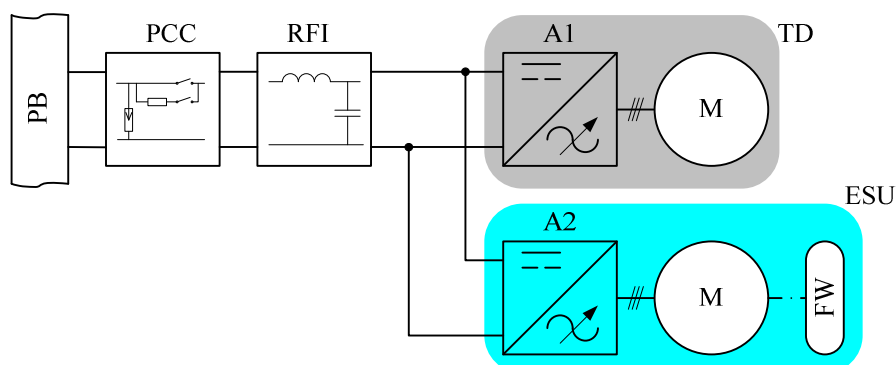
Hoorattaajami kiirust ω hoitakse talitluse käigus piirides $(0,5...1,0) \cdot \omega_N$, mis vastavalt seosele (2.11) võimaldab efektiivselt kasutada kuni 75 % salvestunud koguenergiast. Energiavahetuse efektiivse kiiruspiirkonna suurendamiseks on võimalik kasutada vaheldi A2 ja langetus-tõstemuunduri A1 kaskaadlülitust [FUX07]. Skeemi tuleb ette näha ka sisend- ja filtri ahelad (joon 3.12).



Joonis 3.12. Täiendava langetus-tõstemuunduriga hooratassalvesti [FUX07]

Sõidukil kasutatava hooratassalvesti ühendusskeemi võib tuletada rööplülites ülirikondensaatorsalvesti omast, kus veoajamil ja salvestil on ühised sisend- ja filtri ahelad (joon 3.8). Jõuliides peab ka siin taluma veoajami tsüklilisi koormusi ning täitma reguleeritava vooluallika rolli (joon 3.13).

Säilitamiseks konstantset laadimis- või tühjenemiskoormust, peab hoorattaajami moment muutuma pöördvõrdelises seoses kiirusega. Järelikult, kui jõuliidese esimeses astmes (joon 3.3) reguleeritakse voolu, tuleb teises astmes reguleerida momenti. Nagu elektriajamitehnikas tervikuna, reguleeritakse ka hooratuste momenti enamasti vektorjuhtimise abil, mis põhineb magnetvoo suunavektori määramisel elektrimasina matemaatilise mudeli alusel [GUO07] [SAM06], katseliselt on uuritud ka otsese momendireguleerimise (DTC) sobivust [CIM05].



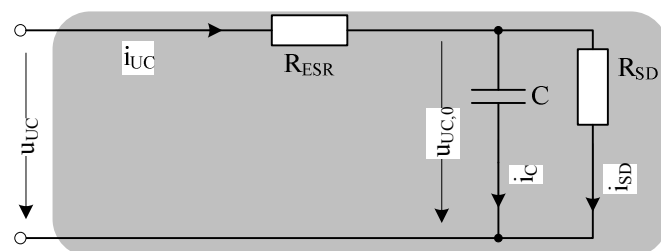
Joonis 3.13. Pardapealse hooratassalvesti ühendusskeem

3.4 Energiasalveste mudelid

Energiasalvesti energiavoogude efektiivseks juhtimiseks tuleb esmalt teada salvestes ja liidestest toimivate füüsikaliste protsesside iseärasusi, st osata piisava täpsusega kirjeldada salvestit kui tehnilist süsteemi. Seejuures tuleb arvesse võtta nii süsteemi staatilist ehk ajas muutumatut struktuuri kui ka dünaamilist ehk ajas muutuvat käitumist, mis on määratud süsteemis toimivate protsessidega [SYR05]. Muutumatut struktuuri on modelleeritav nt askeemide ja ülekandefunktsioonidena, dünaamilised protsessid diferentsiaalvõrranditena. Loodud mudelite põhjal on võimalik simuleerida süsteemi reaktsiooni juhttoimetele ning hiljem realiseerida tulemused juba riistvaras.

3.4.1 Ülikondensaatorpatarei mudel

Ülikondensaatori mudel võtab lihtsustatud askeemina arvesse kondensaatori C nii sise- ehk ekvivalentset jadatakistust R_{ESR} kui ka tühjenemis- ehk rööptakistust R_{SD} [MIE03] [ONA08] (joon 3.14), täpsemateks arvutusteks on kasutusel ka nn *Montena* mudel [KOE05], mis arvestab mahtuvuse sõltuvust pingest, samuti parasiitinduktiivsust arvestavad mudelid [ABB07]. Kui R_{SD} asemel on antud lekkevool I_{SD} , arvutatakse esimene Ohmi seaduse põhjal. Lühiajaliste protsesside modelleerimisel võib R_{SD} jätta arvestamata.



Joonis 3.14. Ülikondensaatori askeem [MIE03] [ONA08]

Patarei moodustamisel sarnastest elementidest või moodulitest teisenduvad ekvivalentsed jada- ja rööptakistused ning mahtuvused kujule

$$\begin{cases} R_{ESR\Sigma} = n_s \cdot \frac{R_{ESR}}{n_p} \\ R_{SD\Sigma} = n_s \cdot \frac{R_{SD}}{n_p} \\ C_{\Sigma} = n_p \cdot \frac{C}{n_s} \end{cases}, \quad (3.1)$$

kus n_s ja n_p on vastavalt jadähenduses ja rööpühenduses elementide arv patareis. Aseskeemi (joon 3.14) kirjeldav võrrandisüsteem on

$$\begin{cases} i_{UC}(t) = C_{\Sigma} \cdot \frac{du_{C,0}(t)}{dt} + \frac{u_{C,0}(t)}{R_{SD\Sigma}} \\ u_{UC}(t) = u_{C,0}(t) + i_{ESU}(t) \cdot R_{ESR\Sigma} \end{cases}, \quad (3.2)$$

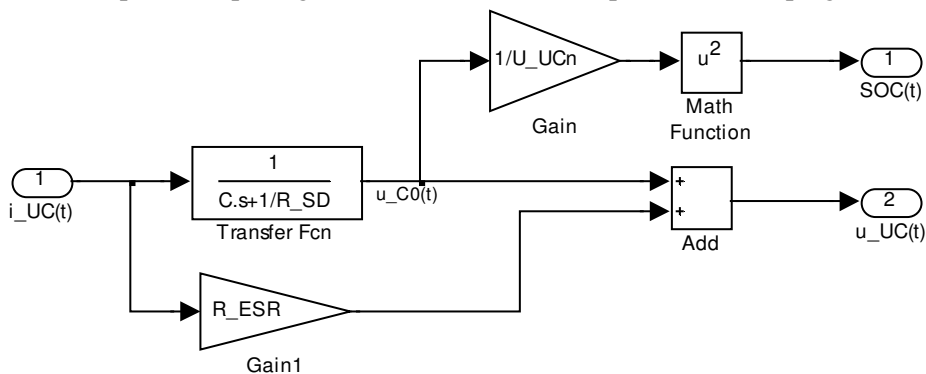
kus $i_{UC}(t)$ on ülikondensaatorpatareid läbiv vool, $u_{C,0}$ tühijooksupinge ja $u_{UC}(t)$ pinge ülikondensaatorpatarei klemmidel. Asendades võrrandisüsteemis (3.2) tuletise d/dt Laplace'i operaatoriga s , on tulemuseks ülekandefunktsioon

$$u_{UC}(t) = i_{UC}(t) \cdot \left(\frac{1}{C_{\Sigma} \cdot s + 1/R_{SD\Sigma}} + R_{ESR\Sigma} \right) \quad (3.3)$$

Võrrandi esimene parempoolne liige kujutab endast kondensaatorpatarei tühijooksupinget, mis määrab ühtlasi hetkelise laetusastme $SOC(t)$

$$u_{C,0}(t) = \frac{i_{UC}(t)}{C_{\Sigma} \cdot s + 1/R_{SD\Sigma}} \quad (3.4)$$

$SOC(t)$ on arvutatav võrrandist (2.7). Seose (3.3) graafiline väljendus *Simulink*'i ülekandefunktsioonina on näidatud joon 3.15. Arvutatud ülekandefunktsioonid iseloomustavad ülikondensaatorpatareid kui vooluallikat. R_{ESR} väiksuse tõttu on laetusaste piisava täpsusega hinnatav ka koormatud patarei klemmipingest.

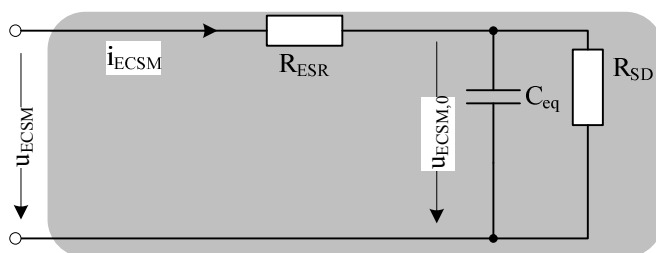


Joonis 3.15. Ülikondensaatori graafiline esitusviis ülekandefunktsioonina

3.4.2 Aku mudel

Elektrokeemiliste salvede modelleerimine on seotud suurte raskustega nendes toimivate sisemiste muundusprotsesside keeruka kirjeldamisvormi tõttu [AFF05] [MIE03], mille põhiliseks iseloomustajaks on energijäägi ja *SOC* mittelineaarne sõltuvus koormusest, mida lihtsustatult väljendatakse Peukert'i valemiga (2.5). Allikad [MIE03] [TRE07] pakuvad kasutamiseks aseskeeme kas fikseeritud või muutuvate parameetritega vastavalt soovitavale arvutustäpsusele, kusjuures parameetrite väärtused määratakse kas katseliselt või tootja andmete põhjal [TRE07]. Akude mudelid on integreeritud ka spetsiaalsesse elekter- ja hübriidsõidukite arvutuspaketti *ADVISOR* [HOU08] [JOH02].

Kontaktliiniga seotud sõidukite puhul, kus energiasalvesti täidab pigem ühtlustavat kui primaarenergiaallika rolli, sobib kasutamiseks lihtsustatud aseskeem (joon 3.16), kus C_{eq} tähendab aku mahutavusele vastavat ekvivalentset takistust, R_{ESR} aku ekvivalentset sisetakistust, R_{SD} isetühjenemist iseloomustavat rööptakistust, $u_{ECSM,0}$ tühijooksupinget, u_{ECSM} aku klemmipinget ja i_{ECSM} akut läbivat voolu.



Joonis 3.16. Aku mahutavuslik aseskeem [GON06]

Joon 3.16 kujutatud aseskeemi parameetrite leidmiseks tuleb kõigepealt teisendada mahutavus ampertundidest džaulideks

$$W_{bat}(I) = Q(I) \cdot U_{bat,N} \cdot 3600, \quad (3.5)$$

kus $W_{bat}(I)$ ja $Q(I)$ on vastavalt aku mahutavused džaulides ja ampertundides keskmisel koormusvoolul I ning $U_{bat,N}$ aku nimi-klemmipinge. Järgmisena arvutatakse ekvivalentne mahutavus koormusvoolu I juures

$$C_{eq}(I) = \frac{2 \cdot W_{bat}(I)}{U_0^2 - U_{min}^2}, \quad (3.6)$$

kus U_0 on aku tühijooksupinge ja U_{min} miinimumpinge. Isetühjenemist iseloomustava ekvivalentse takistuse R_{SD} saab tuletada tootja poolt antud tühjenemisgraafiku põhjal; kuna akude isetühjenemine on pikaajaline protsess, võib R_{SD} elektertranspordi rakendustes, st lühiajaliste protsesside korral, lugeda lõpmatuks ehk jätta ta arvestamata.

Elementide jada- ja rööpühendustest koosneva akupatarei ekvivalentsed mahutavused ja takistused saab arvutada ülikondensaatorpatarei kohta kehtivatest sõltuvustest (3.1), sarnase kujuga on ka ülekandefunktsioon võrrandina (3.3) ja graafilisel kujul (joon 3.15).

3.4.3 Hooratta mudel

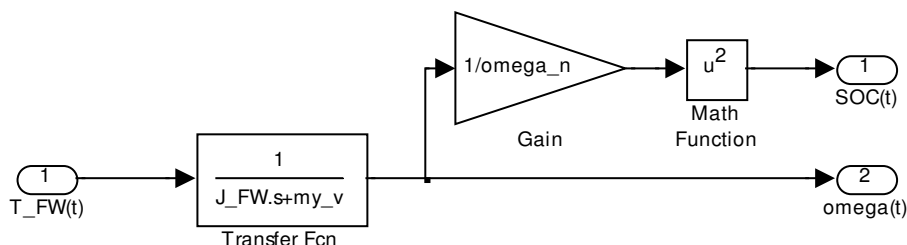
Hooratta kohta on võimalik välja kirjutada pöörleva liikumise põhivõrrand

$$T_{FW} - \omega \cdot \mu_v = J_{FW} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.7)$$

kus T_{FW} on moment hooratta võllil, ω nurkkiirus, μ_v viskooshõõrdetegur ja J_{FW} hooratta inertsimoment. Korrutis $\omega \cdot \mu_v$ iseloomustab kiirusest sõltuvat kaomomenti, mis põhjustab salvesti isetühjenemist. Operaatorkujule üle viies teisendub võrrand (3.7) ülekandefunktsiooniks, mis näitab, et energiavahetust hoorattaga reguleeritakse momendi T_{FW} kaudu.

$$\omega(t) = T_{FW}(t) \cdot \frac{1}{J_{FW} \cdot s + \mu_v} \quad (3.8)$$

Hooratta $SOC(t)$ on arvutatav võrrandist (2.10). Seose (3.8) graafiline väljendus *Simulink*'i ülekandefunktsioonina on näidatud joon 3.17.



Joonis 3.17. Hooratta graafiline esitusviis ülekandefunktsioonina

3.5 Salvestite energiavahetuse juhtimine

Salvestite energiavahetuse reguleerimise põhiülesandeks on hoida energiasiiini elektrilisi parameetreid kindlaksmääratud piirides, vähendamaks tipukoormusi ja pingelangusid ning võimaldamaks taaskasutada pidurdusenergiat. Regulaatorist juhtimisliidesele edastatud signaalidega määratakse juhttoime väärtus ehk ülekantav võimsus. Juhttoime võidakse moodustada *positsioonreguleerimise* põhimõttel salve ühendamise või lahutamiselega energiasiiinist nii, et reguleeritava suurus kõigub pidevalt kahe piiri vahel (kahepositsiooniline juhtimine), või sedasi, et juhttoimed moodustatakse ainult piiride ületamisel (kolmepositsiooniline juhtimine). *Analoogreguleerimisel* on juhttoime pidev funktsioon veasignaalist ning sisuliselt realiseerib seda funktsiooni jõuliides. Lisaks klassikalistele positsioon- ja analoogreguleerimisele leiavad energiasalvestite juhtimisel kasutust ka nn intelligentsed – adaptiiv ja hägusjuhtimismeetodid [LUC08].

3.5.1 Energiavahetuse seisundid

Energiavahetuse seisundid on määratud tarbitava koormusvõimsuse ja salvesti laetusastmega [EHS05]:

1. Primaartoitesüsteemi ja salvesti koostoime sõiduki kiirendamisel või liikumisel ülesmäge. Selline seisund tekib võimsuse puudujärgi korral, kui sõiduki

koormusvõimsus P_L ületab toitesüsteemi tarbitava võimsuse etteantud maksimumi $P_{S,max}$ ja salvesti on võimeline tühjenema, st $SOC(t) > SOC_{min}$. Salvesti võimsus $P_{ESU} = P_{S,hi} - P_L < 0$.

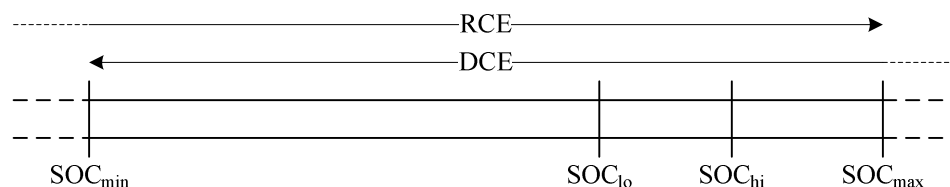
2. Energiavahetuses sõiduki elektripaigaldisega osaleb ainult salvesti. Selline olukord esineb kontaktliinivabal talitlusel või primaartoitesüsteemi hetkeliste pingekatkestuste korral, kui $P_S = 0$ ja $SOC(t) > SOC_{min}$. Salvesti võimsus $P_{ESU} = P_S - P_L < 0$.
3. Energiavahetuses sõiduki elektripaigaldisega osaleb ainult primaartoitesüsteem, kui salvesti pole võimeline energiavahetuses osalema või kui koormusvõimsus jääb lubatud piiridesse.
4. Salvesti laadimine ja veoajami toitmine primaartoitesüsteemist, kui summaarne võimsus jääb alla seadesuurust ja $SOC(t) < SOC_{max}$.
5. Pidurdusenergia salvestamine, kui $P_L < 0$ ja $SOC(t) < SOC_{max}$.

3.5.2 Salvesti laadimis- ja tühjenemisvõime hindamine

Säilitamiseks salvesti võimet osaleda energiavahetusprotsessis, peab energijääki ehk laetusastet SOC hoidma kindlates piirides. Energijäägi reguleerimisel on võimalik kasutada nii maksimaalse laetusastme (SOC_{max}) kui ka kahepositsiooni- ehk releetoimelist meetodit.

SOC_{max} juhtimismeetod põhineb salvesti laetusastme hoidmisel maksimumi lähedal koormustippude katmiseks, mistõttu seda kasutatakse esmajoones primaartoitesüsteemi võimsuse suhtelise piiratuse korral [EHS05]. Kui ülesanneteks on ühtaegu nii tippude võimalikult efektiivne katmine kui ka pidurdusenergia taaskasutamine, on otstarbekas kehtestada eraldi SOC ülempiirid – SOC_{hi} laadimisele väikese vooluga primaarsüsteemist ja SOC_{max} – laadimisele suure vooluga rekuperatiivpidurdusest (joon 3.18). Samal joonisel on tähistatud laadimisvõimekuse piirkond RCE ja tühjenemisvõimekuse piirkond DCE. Primaarsüsteemist laadimine on lubatud, kuni $SOC(t) \leq SOC_{hi}$ ja pidurdusenergia salvestamine, kuni $SOC(t) < SOC_{max}$. Salvesti on tühjenemisvõimeline, kuni $SOC(t) > SOC_{min}$.

Kirjeldataud laetusastme meetodi reguleerimise peamiseks puuduseks on salvesti mahutavuse ebaefektiivsem kasutamine, mis nt kontaktliinivaba liikumise tagamiseks tingib selle mõningase üledimensioneerimise. Kui energiavahetuse juhtimise põhieesmärgiks on ainult pidurdusenergia taaskasutamine, siis $SOC_{hi} = SOC_{max}$.



Joonis 3.18. Salvesti laadimis ja tühjenemispiirkonnad

Laetusastme SOC_{max} või SOC_{hi} hoidmise asemel võib lubada SOC kõikumist kahe nivoo, nt SOC_{lo} ja SOC_{max} vahel (joon 3.18), st kasutada kahepositsioonilist

reguleerimist koos pidurdusenergia salvestamise prioriteediga. Sellisel juhul blokeeritakse laadimine SOC_{max} saavutamisel ja salvestus primaarsüsteemist algab uuesti alles energijäägi langemisel alla defineeritud alampiiri SOC_{lo} , kuid pidurdusenergia vastuvõtmine on võimalik alati, kuni salv pole täitunud. Kuna salve täitumise tõenäosus on väiksem kui SOC_{max} hoidmisel, on salvesti seda suurema tõenäosusega võimeline vastu võtma pidurdusenergiat. Tühjenemine on lubatud kuni $SOC(t) > SOC_{min}$. Piirjuhtumil, kui $SOC_{lo} \approx SOC_{max}$, muutub laadimisvõimekuse hindamine sarnaseks SOC_{max} meetodiga.

Eelkirjeldatud laadimis- ja tühjenemisvõimekuse hindamise meetodid on väljendatavad loogikatehena, kus RCE ja DCE omavad binaarset tõeväärtust, st $RCE \in \{0;1\}$ ja $DCE \in \{0;1\}$, samuti ka rekuperatiivpidurduse olekut kirjeldav muutuja $RB \in \{0;1\}$. Laadimisvõimekus SOC_{max} hoidmisel

$$RCE = RB \wedge (SOC(t) < SOC_{max}) \vee (SOC(t) < SOC_{hi}) \quad (3.9)$$

Laadimisvõimekus SOC kahepositsioonireguleerimisel

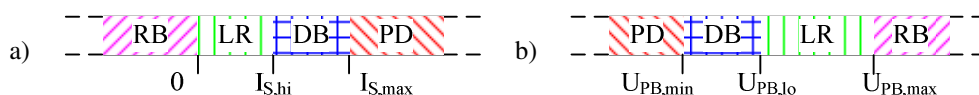
$$RCE = (SOC(t) \leq SOC_{lo}) \vee RCE \wedge (SOC(t) < SOC_{max}) \vee RB \wedge (SOC(t) < SOC_{max}) \quad (3.10)$$

Tühjenemisvõimekus on mõlemal reguleerimisviisil hinnatav sarnaselt:

$$DCE = (SOC(t) > SOC_{min}) \quad (3.11)$$

3.5.3 Võimsuse puudu- ja ülejäägi tuvastamine

Salvesti juhtimisliides peab algatama energiavahetuse, kui energiasiinil tekib võimsuse üle- või puudujääk ja kui salvesti energijääk on saavutanud teatud taseme; selleks tuleb tuvastada vastavad olukorrad (joon 3.19).



Joonis 3.19. Võimsuse puudu- ja ülejäägi tuvastamine voolu (a) ja pinge (b) põhjal

Võimsuse puudujääk ehk vastava binaarmuutuja PD tõeväärtus on tuvastatav kas tarbitava voolu $i_S(t)$ kasvamisega üle etteantud piirväärtuse $I_{S,hi}$ või energiasiini pinge $u_{PB}(t)$ kahanemisega alla sätestatud alampiiri $U_{PB,min}$. Pinge jälgimine on ainuvõimalik võimsusdefitsiidi hindamise viis salvestusalajaamades, kui puudub info vealajaama väljundfiidrite voolu kohta. Voolu väärtuse põhjal saab langetada reguleerimisotsuseid vealajaamade läheduses, kus pingelangud pole tuntavad, või sõiduki pardal, kus võimsuse defitsiit on tuntav nii voolu kasvu kui pinge langemisena. Loogikatehtena

$$PD = (i_S(t) > I_{S,max}) \vee (u_{PB}(t) < U_{PB,min}) \quad (3.12)$$

Rekuperatiivpidurdusoleku RB tõeväärtus on tuvastatav pinge tõusuga koormuse klemmidel, millega sõidukites kaasneb ka voolusuuna muutus energiasiini ja veajami vahel. Loogikatehtena

$$RB = (u_{PB}(t) > U_{PB,max}) \vee (i_S(t) < 0) \quad (3.13)$$

Kuni tarbitav vool ja liinipinge püsivad etteantud vahemikus, jääb salvesti passiivseisundisse ja toimuda võib madala intensiivsusega laadimine LR, mis loogikafunktsioonina avaldub kujul

$$LR = (i_S(t) \geq 0) \wedge (i_S(t) \leq I_{S,hi}) \wedge (u_{PB}(t) \geq U_{PB,lo}) \wedge (u_{PB}(t) \leq U_{PB,hi}) \quad (3.14)$$

Stabiilsuse suurendamiseks on ette nähtud voolu ja pingetundetusoonid DB (joon 3.19a ja 3.19b), mis väldivad võnkumist laadimis- ja tühjenemistalitluse vahel. Kirjeldatud pingete ja voolude piirväärtused võivad olla kas fikseeritud või dünaamiliselt muutuvad vastavalt veovõrgu üldisele võimsusbilansile, ette antuna veovõrgu reaalaja haldussüsteemi poolt.

3.5.4 Energiasalvesti üldistatud juhtimiseeskiri

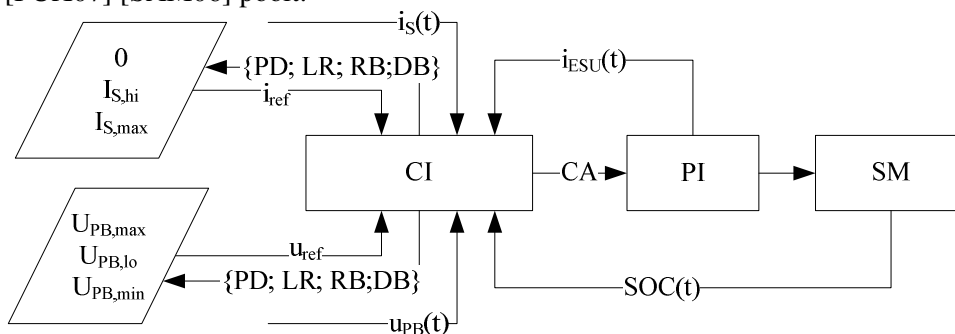
Energiavoogude reguleerimisel voolu järgi on juhtimiseeskiri analüütiliselt väljendatav võimsusseisundi ja laadimis-tühjenemisvõimekuse põhjal.

$$i_{ESU}(t) = (I_{S,max} - i_S(t)) \cdot PD \cdot RCE + \\ + RCA \cdot [(I_{S,hi} - i_S(t)) \cdot LR + i_S(t) \cdot RB] \quad (3.15)$$

Pinge järgi reguleerimisel tuleb salvesti voolu seadesuurus valida selline, et pinge väärtus järgiks ettenähtud piirväärtust või püsiks teatud väärtuste piirkonnas.

$$i_{ESU}(t) = i_{ESU}(u_{PB}(t) = U_{PB,min}) \cdot PD \cdot RCE + \\ + i_{ESU}(U_{PB,lo} \leq u_{PB}(t) \leq U_{PB,hi}) \cdot LR \cdot RCA + \\ + i_{ESU}(u_{PB}(t) = U_{PB,max}) \cdot RB \cdot RCA \quad (3.16)$$

Juhtimiseeskirja täitmiseks kasutatakse mitmekontuurilisi juhtimisahelaid, mis vastavalt anduritelt saadud mõõteväärtustele moodustavad juhttoime eesmärgiga saavutada soovitud seisund, st voolu või pinget etteantud väärtus. Salvesti energiavahetuse lihtsustatud juhtimis skeemil (joon 3.20) on kijutatud, kuidas regulaatori rollis juhtimisliides CI arvutab vastavalt salvesti laetusastmele $SOC(t)$, energiasiooni pingele $u_{PB}(t)$, võrgust tarbitavale voolule $i_S(t)$ seadesuurused i_{ref} ja u_{ref} ning moodustab jõuliidese PI juhttoimed CA, millega reguleeritakse energiasiooni PB ja salve SM vahelist energiavahetust. Juhtimiskontuure ülikondensaatoritele on täpsemalt kirjeldatud [CHE06] [LIU09] [LOH04] ja hooratassalvestitele [CHA07] [FUX07] [SAM06] poolt.



Joonis 3.20. Energiasalvesti lihtsustatud andmevahetusskeem

4 Energiatarbimise analüüsi ja salvesti arvutusmetoodika

Energiasalvesti dimensioneerimiseks on vaja esmalt teada selle prioriteetset ülesannet, milleks võib olla kas [FLA05] [STE04]

- 1) tarbitava võimsuse silumine,
- 2) pidurdusenergia taaskasutamine,
- 3) kontaktliini pingestabiliseerimine,
- 4) autonoomne liikumine kontaktliinita.

Arvutuste tulemusena saadakse erinevad vajatava suurima võimsuse ja energia paarid $\{P_{ESU,i}; W_{ESU,i}\}$, kus i on ülesande järjekorranumber. Kui on vaja lahendada mitu ülesannet üheaegselt, valitakse võimsuse-energia paari liikmed lahendite maksimumväärtuste põhjal, st $\{P_{ESU}; W_{ESU}\} = \{\max(P_{ESU,i}); \max(W_{ESU,i})\}$.

Energiasalvesti parameetrite arvutamiseks vajalike lähteandmete leidmiseks on mitmeid võimalusi, mis sõltuvad sellest, kas seade on mõeldud sõidukitele või kontaktvõrku, mis on kas alles projekteerimisjärgus või moderniseeritavad. Olemasolevate võrkude ja sõidukite puhul on võimalik kasutada koormusvõimsuste ja toitepingete statistilist analüüsi, mille alusel arvutatakse energiasalvesti parameetrid käesolevas peatükis; uute lõikude rajamisel on kasulikud tarkvarapakettid, mis modelleerivad kadusid ja tarbitavat võimsust sõltuvalt eeldatavatest liiklustingimustest [BAR08] [DES07]. Statistilise andmeanalüüsi kasutamisel, millel põhineb pakutav arvutusmetoodika, tuleb tagada analüüsitava valimi representatiivsus, st aluseks olevad andmed peavad võimalikult suures ulatuses langema kokku uuritava objekti või protsessi tegeliku olemusega. Sõiduki puhul tähendab see andmete registreerimist piisavalt väikese intervalliga terve marsruudi vältel, veoalajaama korral tehakse väljavõtted kindla ajavahemiku, tavaliselt tipptunni kohta.

4.1 Analüüsitud üldvalimite kirjeldus

Toitevõimsuse silumiseks vajaliku energiasalvesti põhiparameetrite arvutusteks ja graafikute koostamiseks vajalikud aegread on saadud trammide, trollide, elektrirongide ja veoalajaama koormusvõimsuste mõõtmiste tulemusena varasemate uurimuste käigus [BOI01] [JOL98] [MÖL05] ja TTTK elektrimajandi spetsialistidelt. Tabelis 4.1 on kirjeldatud arvutuste aluseks olevad võimsuste ja pingete aegread $\{P_{L,i}; U_{L,i}\}$, kus $i = 1..n$, n – üldvalimi maht ja Δt – mõõteintervall.

Tabel 4.1. Analüüsitud üldvalimid

Objekti nimetus	Objekti lühend	n	Δt [s]
Tramm KT4 liinil Tondi-Ülemiste	KT4-TÜ	3600	0,5
Tramm KT4 liinil Kopli-Kadriorg	KT4-KK	5000	0,25
Troll 14Tr liinil Mustamäe-Kaubamaja-Mustamäe	14Tr-MKM	3100	1,0
Elektrirong ER1S liinil Paldiski-Balti jaam	ER1S-PB	4400	1,0
Elektrirong ER1S liinil Lagedi-Aegviidu	ER1S-LA	4400	1,0
Trammi veoalajaam nr 4	VAJ-4	1800	1,0

4.2 Koormusvõimsuste ja toitepingete jaotumise analüüs

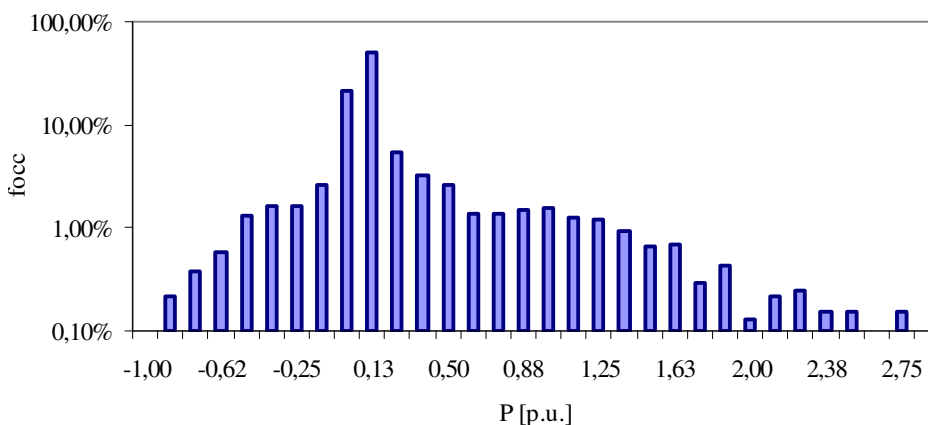
4.2.1 Võimsuse histogrammid

Elektersõidukite ja veoalajaamade koormus sõltub mitmetest teguritest, millest paljud pole prognoositavad. Põhilised faktorid, mis määravad tarbitava võimsuse, sõltuvad sõidukite puhul [EHS05]

- 1) sõiduki kiirusest,
- 2) tee profiilist,
- 3) sõiduki kiirendusest.

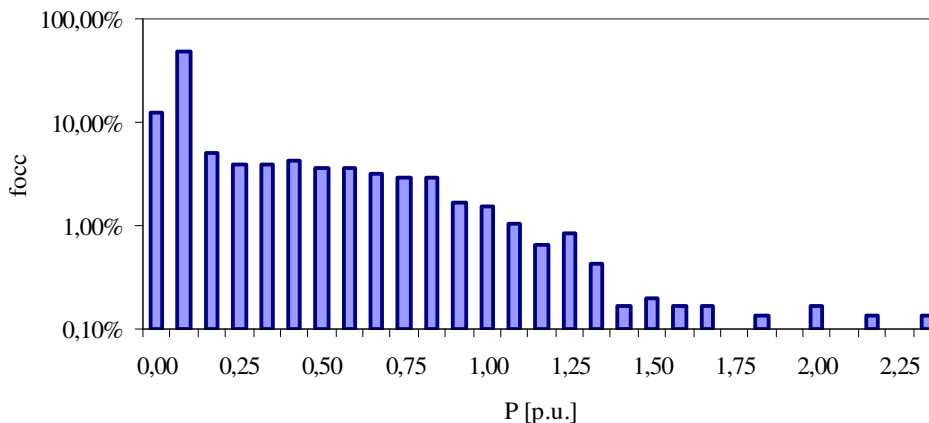
Kaks esimest komponenti loetelus määravad liikumistakistuse, kolmas dünaamilise takistusjõu. Veoalajaamade hetkvõimsus on määratud kõigi tema teeninduspiirkonnas asuvate sõidukite koormusvõimsuste hetkväärtuste summana. Ainsa mittemuudetava faktorina põhjustavad tee profiili muutused koormusgraafikutes suure amplituudiga nn makrotsükleid, kus tõusude ületamisel läheb vaja täiendavat võimsust. Väikese amplituudiga makrotsüklid iseloomustavad liikumist püsikiirusel, kui profiilist tingitud liikumistakistus on minimaalne. Suure amplituudiga mikrotsüklid on põhjustatud lühiajalistest koormustippudest, mis kaasnevad sõiduki kiiruse muutumisega ajas ehk kiirendusega.

Koormusvõimsuse jaotumist üldvalimi aegreas väljendatakse graafiliselt histogrammidega, kus horisontaaltelele paigutatakse klassidesse jaotatud võimsus ja vertikaaltelele klassi suhteline esinemissagedus. Histogrammide alusel saab teha järeldusi marsruudi ja juhi sõidustiili kohta; nt joon 4.1 toodud graafik iseloomustab võimsuste jaotust trammiliinil Tondi-Ülemiste. Kõige tõenäolisemalt (suhteline esinemissagedus $f_{occ} > 5\%$) jääb trammi koormusvõimsus vahemikku (0...0,25)-p.u. Suurema amplituudiga makrotsüklid ($1\% \leq f_{occ} \leq 5\%$) kirjeldavad liikumist ülesmäge, mikrotsüklid amplituudiga üle 2,5 p.u. on põhjustatud kiirendustest ja negatiivse amplituudiga mikrotsüklid rekuperatiivpidurdusest. Kõikide uuritud sõidukite suhteliste võimsuste ühikute baassuurused on toodud tabelis 1.7.



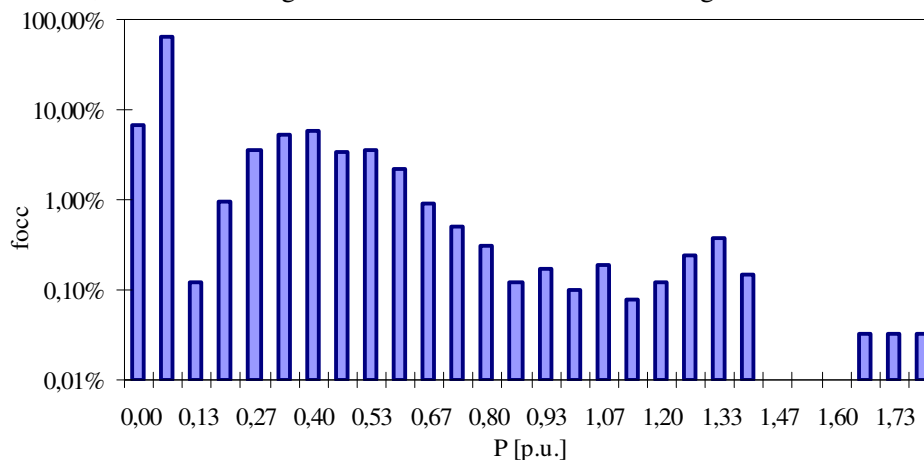
Joonis 4.1. Trammi KT4 võimsuste histogramm marsruudil Tondi-Ülemiste

Trolliliinil Mustamäe-Kaubamaja-Mustamäe mõõdetud koormused on jaotatud joon 4.2 toodud histogrammi. Väiksem mass tingib ka mikrotsüklite väiksema amplituudi võrreldes trammidega. Kuna 2. põlvkonna trollidel puudub rekuperatsioon, ei esine ka negatiivse amplituudiga mikrotsükleid.



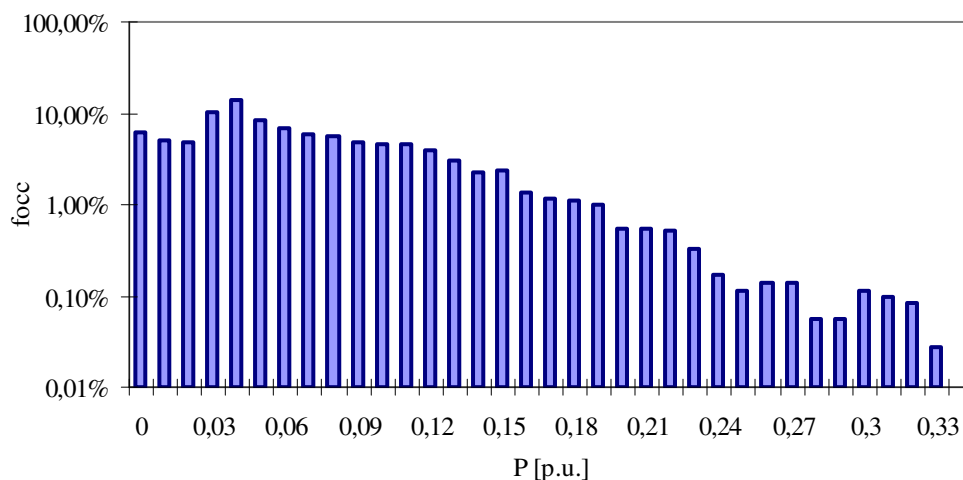
Joonis 4.2. Trolli 14Tr võimsuste histogramm marsruudil Kaubamaja-Mustamäe

Marsruudil Paldiski-Balti Jaam liikunud elektrirongi puhul (joon 4.3) torkab silma suure amplituudiga mikrotsüklite osakaal tingituna raudteeveeremi massist, lisaks plaanilistele peatustele tingib võimsustippe infrastruktuuri ehk rööbastee seisund, kuna teatud lõigud tuleb läbida vähendatud kiirusega.



Joonis 4.3. Elektrirongi ER1S võimsuste histogramm marsruudil Paldiski-Balti jaam

Vealajaamade koormusgraafik kujuneb teeninduspiirkonnas liiklevate sõidukite koormusgraafikute summeerimisel. Mitme sõiduki liiklemisel alajaama teeninduspiirkonnas võivad nende koormusgraafikud üksteist ühtlustada, nii et histogrammi tipp logaritmilisel skaalal on võrdlemisi lame (joon 4.4). Aegrea analüüs näitab, et trammiliiklust teenindav alajaam nr 4 töötab alakoormusel, kuna tema tipuvõimsus jääb tunduvalt allapoole agregaatide installeeritud võimsust (tabel 1.2).



Joonis 4.4. Vealajaama nr 4 koormuste histogramm

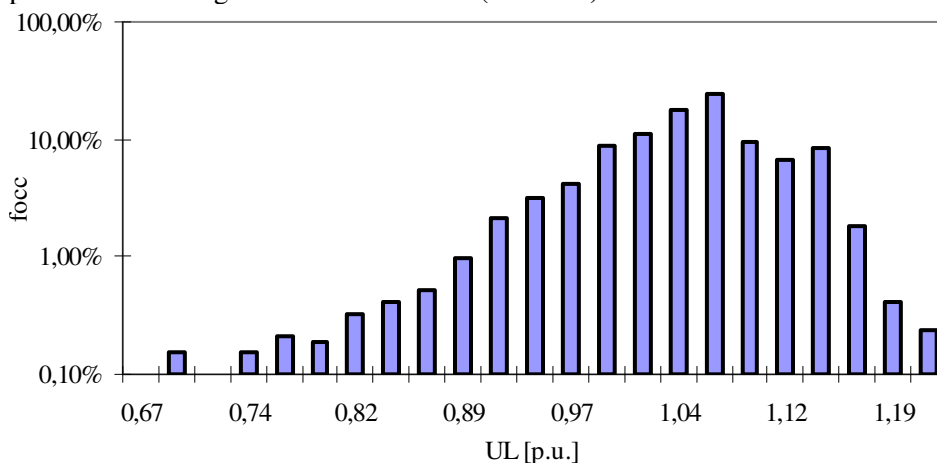
4.2.2 Pinge histogrammid

Sõidukite toitepingete histogrammid näitavad pinget kõikumist kontaktliini ja vooluvõtja ühenduspunktis, mis on määratud [MÄG07]

- 1) kontaktjuhtme ristlõikega;
- 2) alalisvoolu toitekaablite pikkuse ja ristlõikega;
- 3) sõidukite arvu ja asukohaga kontaktliini seksioonil;
- 4) sõidukite hetkvõimsustega kontaktliini seksioonil;
- 5) sõidukite hetkvõimsustega vealajaama teeninduspiirkonnas.

Viimane punkt iseloomustab olukorda, kus energiavahetus pidurdava ja kiirendava sõiduki vahel toimub läbi vealajaama lattide, st ühes seksioonis pidurdav sõiduk tõstab pinget ka teistes seksioonides.

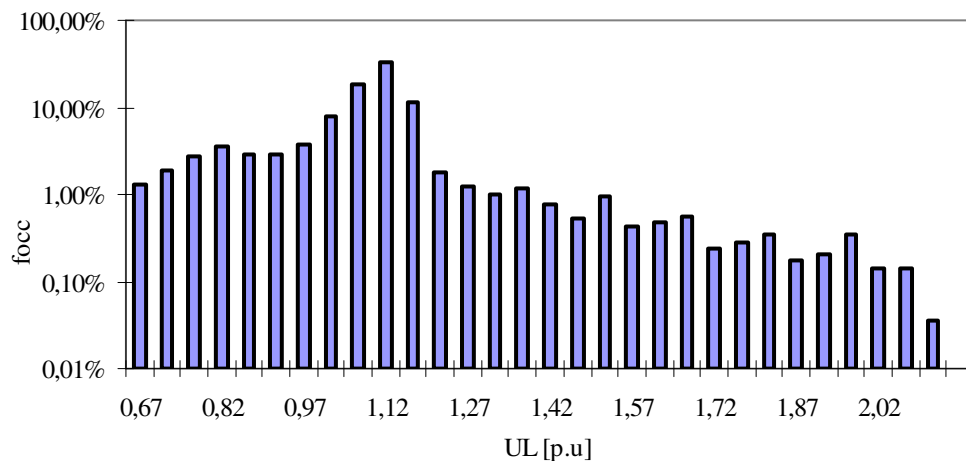
Trammi pingete esinemissagedust jälgides (joon 4.5) võib täheldada nende püsimist normidega lubatud vahemikus (tabel 1.1).



Joonis 4.5. Trammi KT4 pantograafi pingete histogramm marsruudil Tondi-Ülemiste

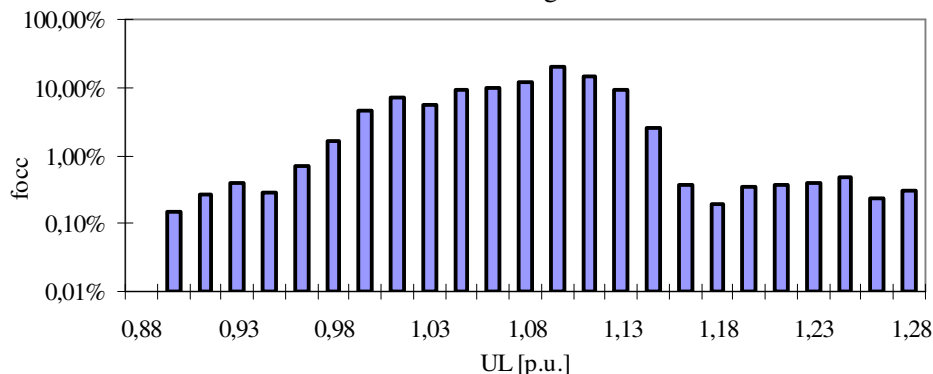
Pantograafi pinged püsivad vahemikus (0,99...1,09)-p.u. 72 % juhtudest. Kõrgemal on pinged 18 % ja madalamad 10 % registreeritud mõõtetulemustest. Saadud tulemused lubavad eeldada, et energiasalvesti kasutamine pinget stabiliseerimiseks antud sõidukil ja marsruudil on rentaabel.

Lisaks võivad kontaktliini pinget mõjutada kommutatsiooniga kaasnevad siirdeliigpinged, mis põhjustavad piike. Joonis 4.6 ilmestab hetkeliste liigpingete suhtelist esinemissagedust 2. põlvkonna trollibussi 14Tr vooluvõtjatel, mida võib seletada ebaefektiivsete liigpingepiirikutega türistorpingemuunduri sisendis ning halva kontaktiga vooluvõtja kinga ja juhtme vahel. 74 % mõõtmistest andis vahemikuks (0,97...1,16)· U_N , madalam oli pinged 15 % ja kõrgem 11 % tulemustest. Siirdeliigpingete esinemine annab põhjust viia trollide kontaktvõrgus täiendavaid EMC mõõtmisi ja võtta tarvitusele meetmeid elektromagnethäirete vähendamiseks.



Joonis 4.6. Trolli 14Tr vooluvõtja pingete histogramm marsruudil Mustamäe-Kaubamaja

Elektrirongi ER1S pinged püsivad 93 % juhtudest vahemikus (0,98...1,13)-p.u. (joon 4.7). Sellest vahemikust kõrgemaid ja madalamaid väärtusi tuvastati vastavalt 8 % ja 2 % juhtudest, mis annab taas aluse eeldada pinget stabiliseerimise rentaablust sobivalt dimensioneeritud salvestiga.



Joonis 4.7. Elektrirongi ER1S toitepingete histogramm marsruudil Paldiski-Balti Jaam

4.3 Koormuse ja kontaktliini pingest statistiline hindamismeetod

Koormusvõimsuste üldvalimit moodustavaid andmeridasid saab statistiliselt kirjeldada, analüüsides hälbeid ja integreerimise ajaskaalat sobiva kestusega keskmistamisperioodides [PAA05]. Normaliseeritud väärtus ja standardhälve koos integreerimise ajaskaalaga on konkreetset keskmistamisperioodi iseloomustavad statistilised näitajad. Integreerimise ajaskaala väljendab keskmist aega, mille vältel kõikumisi üksteisega korreleeritakse [ROH94], normaliseeritud standardhälvet kasutatakse silumise efektiivsuse määramiseks.

Autokorrelatsioon kujutab endast valimi liikmete väärtuste omavahelist korrelatsiooni. Autokorrelatsioonikordaja r keskmistamisperioodi etteantud vahemikus m on määratud kujuga [PIN98]

$$r_m = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} (X_i - X_{av}) \cdot (X_{i+m} - X_{av})}{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{av})^2} \quad (4.1)$$

kus n on liikmete arv keskmistamisintervallis T_{av} , X_{av} analüüsitava suuruse keskmistamisintervalli aritmeetiline keskmine ja $m = 1, 2, 3, \dots, n/4$.

Järgmisena arvutatakse analüüsitava suuruse integreerimise ajaskaala:

$$T_{\text{int}} = \int_{m=1}^{m_r=0} r_m dt = \Delta t \cdot \sum_{m=1}^{m_r=0} r_m, \quad (4.2)$$

kus Δt on mõõtmiste intervall ja $m_{r=0}$ on väärtus, mille juures muutub $r_m \leq 0$. T_{int} on suurus, mis iseloomustab jälgitava suuruse kõikumise perioodilisust, st mida suurem on nimetatud näitaja, seda aeglasemalt muutub suurus.

Analüüsitava suuruse normaliseeritud standardhälve

$$\sigma_{p.u.} = \frac{1}{X_N} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - X_{av})^2}, \quad (4.3)$$

kus X_N on jälgitava suuruse nimiväärtus. Standardhälve näitab statistikas parameetri väärtuse kõikumise ulatust – mida suurem on standardhälve, seda erinevamad on väärtused valimis.

Analüüsitava suuruse normaliseeritud väärtus suhtelistes ühikutes (p.u.) avaldub siis kujul

$$X_{av,p.u.} = \frac{X_{av}}{X_N}. \quad (4.4)$$

4.4 Salvasti arvutusmeetod madalpääsfiltri analoogia alusel

Mingi väärtuse järsked kõikumised ehk mikrotsükleid saab kirjeldada signaalitöötlemise analoogia alusel kõrgsagedusliku müra, mida surutakse alla diskreetsete madalpääsfiltrite abil. Filtri töö sarnaneb energiasalvesti tühjenemisega või laadimisega muutliku koormuse tingimustes, kui toiteallikast tarbitava võimsuse kõikumised tuleb hoida võimalikult kitsastes piirides. Edasine analüüs eeldab, et

energia salvestamine toimub kadudeta ja salvesti reageerib reguleerimissignaalidele viiteta; selline meetod lubab uurida energiasalvesti mõju toiteliinist tarbitavale võimsusele ja energiasiini pingele mahutavuse ja võimsuse suhet väljendavate erinevate väärtusega ajakonstantide kaudu. Madalpääsfiltri analoogiale rajanev arutluskäik on leidnud varem kasutust tuuleparkide energiasalvestite arvutamisel [PAA05].

Esimest järku madalpääsfilter avaldub analüütilisel kujul [NIL96]

$$X_{in} = \tau \cdot \frac{dX_{out}}{dt} + X_{out}, \quad (4.5)$$

kus X_{in} on filtri sisend ehk stabiliseerimata väärtus, τ on filtreerimise ajakonstant, X_{out} on filtri väljundsuurus, mis vastab stabiliseerimata sisendi ja filtri poolt lisatava stabiliseeriva komponendi summale, st stabiliseeritud väärtusele. Asendades eelmises võrrandis (4.5) tuletise ajamuuduga $\Delta t \rightarrow 0$, saame sõltuvuse diskreetsel kujul diskreetimisvahemiku k jaoks:

$$X_{in,k} = \tau \cdot \frac{X_{out,k} - X_{out,k-1}}{\Delta t} + X_{out,k} \quad (4.6)$$

Stabiliseeritud väljund on seega rekursiivne funktsioon

$$X_{out,k} = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot X_{out,k-1} + \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} \cdot X_{in,k} \quad (4.7)$$

Võrrandi (4.7) esimene parempoolne liige iseloomustab filtri väljundit eelneval diskreetimissammul (inerts) ja viimane liige tegeliku sisendväärtuse ehk koormusvõimsuse osakaalu. Mida suurem on ajakonstant, seda vähem mõjutab toiteliinist tarbitavat võimsust koormusvõimsuse kõikumine.

Defineerides konstandi $\alpha = \tau / (\tau + \Delta t)$, muutub madalpääsfiltri esitusviis diskreetsel kujul eksponentsiaalselt kaalutud libisevaks keskväärtuseks (EWMA):

$$X_{out,k} = \alpha \cdot X_{out,k-1} + (1 - \alpha) \cdot X_{in,k} \quad (4.8)$$

EWMA filter lubab ennustada jälgitava parameetri väärtust järgneval ajahetkel [BOX09]. Filtreerimise tõhusust antud ajakonstandi juures saab hinnata filtreeritava suuruse standardhälbe ja integreerimise ajaskaala muutumise järgi.

4.5 Salvesti parameetrite arvutusmeetodid

4.5.1 Salvesti parameetrite arvutamine toitevõimsuse silumiseks

Toitevõimsuse silumisel on EWMA filtri väljundfunktsiooniks

$$P_{ESU,k} = P_{L,k} - P_{S,k}, \quad (4.9)$$

kus $P_{L,k}$ on koormusvõimsus ja $P_{S,k}$ võrgust tarbitav võimsus diskreetimishetkel k . Kombineerides omavahel seosed (4.8) ja (4.9), tuleb filtrist ehk energiasalvestist tarbitavaks võimsuseks

$$P_{ESU,k} = \alpha \cdot P_{S,k-1} + (1 - \alpha) \cdot P_{L,k} - P_{L,k} = \alpha \cdot (P_{S,k-1} - P_{L,k}) \quad (4.10)$$

Lahendades võrrandi (4.9) $P_{L,k-1}$ jaoks ja sisestades tulemuse võrrandisse (4.10), tuleb salvesti hetkvõimsuseks

$$P_{ESU,k} = \alpha \cdot (P_{ESU,k-1} + P_{L,k-1} - P_{L,k}) = \alpha \cdot (P_{ESU,k-1} + \Delta P_{L,k}) \quad (4.11)$$

Arvutustsükli alguses ($k = 1$) tuleb määrata algväärtus $P_{ESU,0} + P_{L,0}$. Algväärtus on leitav perioodiliste ääretingimuste iteratsioonil tingimusega, et salvesti mahutavus tuleks võimalikult väike.

Salvestist hetkeks k tarbitud energiahulk avaldub diskreetsel kujul

$$W_{ESU,k} = -\Delta t \cdot \sum_{m=1}^k P_{ESU,m} \quad (4.12)$$

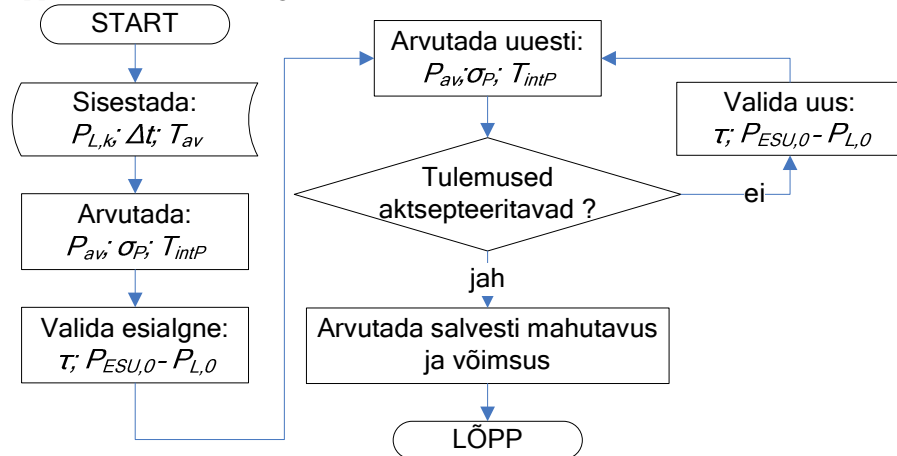
Seejärel saab leida kõikumiste silumiseks kuluva energiahulga

$$W_{ESU} = \max_{k=1..n} W_{ESU,k} - \min_{k=1..n} W_{ESU,k} \quad (4.13)$$

kus n on energia aegrea liikmete koguarv. Energiasalvesti suurim võimsus

$$P_{ESU} = \max_{k=1..n} P_{ESU,k} \quad (4.14)$$

Toiteliini koormuse silumiseks vajaliku energiasalvesti mahutavuse ja võimsuse leidmise arvutuskäik on toodud voodiagrammil joon 4.8. Salvesti parameetrid arvutatakse tabelarvutusprogrammi *MS Excel* abil koos *VBA (Visual Basic for Applications)* makrodega.



Joonis 4.8. Toiteliini võimsust siluva energiasalvesti põhiparameetrite leidmine

Võimsuse integreerimise ajaskaala T_{intP} ja σ_P arvutatakse seoste (4.2) ja (4.3) alusel iga ajakonstandi väärtuse juures uuesti. Programselt on võimalik anda korraga ette mitu ajakonstandi väärtust, millele seatakse vastavusse salvesti nõutavad parameetrid. Toitevõimsuse silumiseks vajaliku energiasalvesti parameetrite leidmiseks kirjutatud VBA makroprogramm viib arvutuse läbi järgmistes etappides:

1. Üldvalimi lugemine massiivi $\{P_{L,i}\}$, kus $i = 1 \dots n$.
2. Etteantud ajakonstantide hulga m lugemine massiivi $\{\tau_j\}$, kus $j = 1 \dots m$.
3. Massiivide $\{\tau; P_{S,i}; P_{ESU,i}; W_{ESU,i}\}_j$ arvutamine iga τ_j jaoks võrrandite (4.8), (4.11) ja (4.12) järgi.
4. Massiivi $\{\tau_j; W_{ESU,j}; P_{ESU,j}\}$ leidmine sõltuvustest (4.13) ja (4.14).

5. Üldvalimi jaotamine keskmistamisperioodi T_{av} järgi keskmistamisvalimiteks koguarvuga $k = \lceil n \cdot \Delta t / T_{av} \rceil$.
6. Keskmistamisvalimi massiivide $\{P_{av,q}; \sigma_{P,q}; T_{intP,q}\}$ ja $\{\tau; P_{av,q}; \sigma_{P,q}; T_{intP,q}\}_j$ arvutamine (4.1)...(4.4) alusel, kus $q = 1 \dots k$. Esimene massiiv kujutab endast juhtumit ilma energiasalvestita, kui $\tau = 0$ ja $P_S = P_L$.
7. Massiivi $\{\tau_j; P_{av,j}; \sigma_{P,j}; T_{intP,j}\}$ arvutamine, kus $P_{av,j}; \sigma_{P,j}; T_{intP,j}$ on keskmistamisvalimite aritmeetilised keskmised τ_j juures.

Koos eelpool kirjeldatud numbriliste näitajatega on mõttekas kasutada graafikuid $P_S(i) = f(\tau)$, mis toovad veelgi näitlikumalt esile liinist tarbitava võimsuse ajalise kulgemise muutumise erinevate väärtustega ajakonstantide juures.

4.5.2 Kontaktliini pinget stabiliseeriva salvesti arvutusmeetod

EWMA filtri diskreetse võrrandi (4.8) rakendamisel kontaktliini pingele tuleb viimase väärtuseks

$$U_{out,k} = \alpha \cdot U_{out,k-1} + (1 - \alpha) \cdot U_{in,k}, \quad (4.15)$$

kus $U_{out,k}$ ja $U_{in,k}$ on vastavalt vooluvõtja pinged salvesti olemasolul ja selle puudumisel diskreetimishetkel k .

Stabiliseeriva komponendi tõttu võrgust tarbitav võimsus kas väheneb või suureneb vastavalt sellele, kas pinget on vaja tõsta või langetada, erinevuse katab energiasalvesti hetkvõimsusega:

$$P_{ESU,k} = P_{L,k} \cdot \left(\frac{U_{out,k}}{U_{in,k}} - 1 \right) \quad (4.16)$$

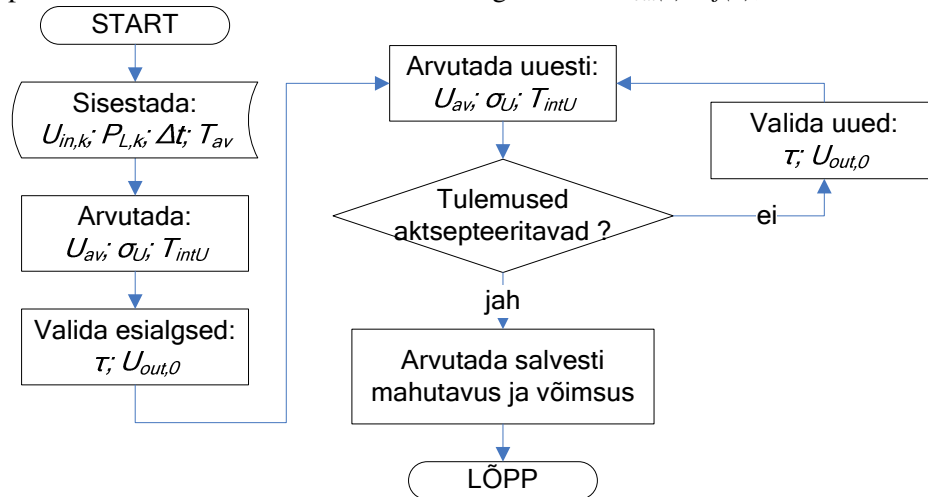
Salvesti võimsus on määratud fiktiivse filtri väljund- ja sisendpingete suhtega. Pinge tõstmise talitluses toimib sisendväärtus vastuelektromotoorjõuna, st liinipinge kadu tähendab lühist; seepärast ei saa seost (4.16) kasutada kontaktliinivaba liikumise jaoks.

Sarnaselt liini koormuse silumisega tuleb alguses ($k = 1$) määrata algväärtus U_{out0} salvesti mahutavuse minimeerimise eesmärgiga. Salvesti võimsused ja energiad on leitavad seostest (4.12)...(4.14). Liinipinge stabiliseerimiseks vajaliku energiasalvesti parameetrite leidmiseks kirjutatud VBA makroprogramm viib sarnaselt koormusvõimsuse silumisele arvutuse läbi järgmistes etappides:

1. Üldvalimi lugemine massiivi $\{U_{in,i}; P_{L,i}\}$, kus $i = 1 \dots n$.
2. Etteantud ajakonstantide hulga m lugemine massiivi $\{\tau_j\}$, kus $j = 1 \dots m$.
3. Massiivide $\{\tau; U_{out,i}; P_{ESU,i}; W_{ESU,i}\}_j$ arvutamine iga τ_j jaoks (4.15), (4.16) ja (4.12) järgi.
4. Massiivi $\{\tau_j; W_{ESU,j}; P_{ESU,j}\}$ leidmine sõltuvustest (4.13) ja (4.14).
5. Üldvalimi jaotamine keskmistamisperioodi T_{av} järgi keskmistamisvalimiteks koguarvuga $k = \lceil n \cdot \Delta t / T_{av} \rceil$.
6. Keskmistamisvalimi massiivide $\{U_{av,q}; \sigma_{u,q}; T_{intU,q}\}$ ja $\{\tau; U_{av,q}; \sigma_{u,q}; T_{intU,q}\}_j$ arvutamine (4.1)...(4.4) alusel, kus $q = 1 \dots k$. Esimene massiiv kujutab endast juhtumit ilma energiasalvestita, kui $\tau = 0$ ja $U_{out} = U_{in}$.

7. Massiivi $\{\tau_j; U_{av,j}; \sigma_{U,j}; T_{intU,j}\}$ arvutamine, kus $U_{av,j}; \sigma_{U,j}; T_{intU,j}$ on keskmistamisvalimite aritmeetilised keskmised τ_j juures.

Toiteliini pinget stabiliseerimiseks vajaliku energiasalvesti mahutavuse ja võimsuse leidmise arvutuskäik on toodud voodiagrammil joon 4.8. Ka siin on piltlikustamise mõttes soovitatav koostada graafikud $U_{out}(i) = f(\tau)$,



Joonis 4.9. Toiteliini pinget stabiliseeriva energiasalvesti põhiparameetrite leidmine

4.5.3 Pidurdusenergia salvesti arvutusmeetod

Rekuperatiivpidurdusenergia taaskasutamiseks peab mahutavusest piisama sõiduki kineetilise energia muutumisele ΔW_k vastava energiahulga talletamiseks

$$W_{ESU} = \Delta W_k = \frac{\delta \cdot m_v}{2} \cdot (v_i^2 - v_f^2), \quad (4.17)$$

kus m_v on sõiduki mass, δ sõiduki pöörlevate osade liikumist arvestav inertsitegur, v_i sõiduki algkiirus ja v_f lõppkiirus. Kuna rekuperatiivpidurdus toimib efektiivselt teatud miinumkiiruseni, siis $v_f \neq 0$. Allika [TAK02] andmetel on võimalik salvestada kuni 80 % sõiduki kineetilisest energiast algkiirusel, seega seos (4.17) lihtsustub kujule

$$W_{ESU} = \Delta W_k = 0,8 \cdot \frac{\delta \cdot m_v}{2} \cdot v_i^2 \quad (4.18)$$

Nii (4.17) kui (4.18) näitavad, et pidurdusenergia taaskasutamisega kaasnev energiasääst ja vajalik salvestusvõime kasvavad võrdeliselt sõiduki massiga ja ruutvõrdeliselt kiirusega.

Pidurdusenergia salvesti võimsus sõltub pidurdusajast t_{br} , mis on omakorda määratud standardis lubatava keskmise aeglustusega a_e [EVS03]. Sõiduki kineetilise energia kahanemisele 80 % ulatuses vastab lõppkiirus $v_f = 0,45 \cdot v_i$, seega saab avaldada salvestusvõimsuse kujul

$$P_{ESU} = \frac{\Delta W_k}{t_{br}} = \frac{\Delta W_k \cdot a_e}{v_i - v_f} = \frac{\Delta W_k \cdot a_e}{0,45 \cdot v_i} \quad (4.19)$$

4.5.4 Salvesti arvutusmeetod kontaktliinivabal liikumisel

Autonoomse liikumise tagamiseks vajalik salvesti mahutavus sõltub läbitava lõigu pikkusest, üldistamiseks on võimalik arvutada energiakulu teepikkuse ühiku Δs kohta. Kuna lõikude energiakulu võib varieeruda sõltuvalt liiklustingimustest ja tee profiilist, on otstarbekas terve trassi aritmeetilise keskmise asemel kasutada vajamineva salvestusvõime hindamiseks nn pikkusühiku libisevaid suursi, millest saadakse mahutavuste ja võimsuste massiiv $\{W_{ESU,i}; P_{ESU,i}\}$.

$$W_{ESU,i} = \max_{s=s_i \dots s_i + \Delta s} W_{L,s} - \min_{s=s_i \dots s_i + \Delta s} W_{L,s} \quad (4.20)$$

$$P_{ESU,i} = \max_{s=s_i \dots s_i + \Delta s} P_{L,s}$$

kus $W_{L,s}$ ja $P_{L,s}$ on vastavalt tarbitud energia ja koormusvõimsus marsruudi punktis s ning s_i algselt läbitud distants. Vajalik energia ja võimsus, kui sõiduk peab olema võimeline katma kontaktliinivabalt ettenähtud distantsi Δs terve trassi ulatuses, avalduvad kujul

$$W_{ESU} = \max_{i=1 \dots m} W_{ESU,i} \quad (4.21)$$

$$P_{ESU} = \max_{i=1 \dots m} P_{ESU,i}$$

kus m on arvutatud libisevate suuruste arv. Kui planeeritakse rajada uusi elektrifitseerimata lõikusid, on energiakulu modelleeritav tee profiili, sõiduki näitajate ja eeldatavate liiklustingimuste järgi [HOU08] [JON05].

4.6 Arvutusmetoodika rakendusnäited

Avaldiste (4.1)...(4.20) põhjal on võimalik määrata defineeritud ülesande (koormuse ühtlustamine, pinge stabiliseerimine, pidurdusenergia taaskasutamine, autonoomia) täitmiseks vajalike salvestite põhiparameetrid. Objektid, millele metoodika rakendati, on edaspidi tähistatud tabelis 4.1 märgitud lühenditega. Statistiliste arvnäitajate keskmistamisperioodiks T_{av} valiti 60 s, rongidel 240 s. Suhtelised suurused on arvutatud tabelites 1.2 ja 1.7 toodud näitajate alusel.

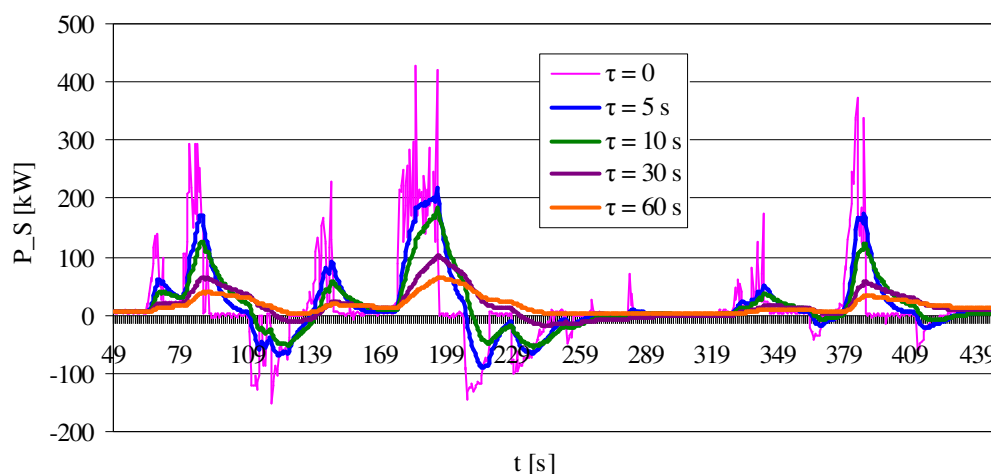
4.6.1 Liini koormuse ühtlustamine

Alljärgnevalt on toodud tabelid ja graafikud, mis näitavad toiteliinist tarbitava koormuse sõltuvust salvesti ajakonstandist. $\tau = 0$ korral energiasalvesti puudub. Analüüs näitab, et juba väikese ajakonstandi juures on võimalik saavutada kontaktliini koormustippude tunduv allasurumine, kusjuures keskmine võimsus vaadeldavas perioodis ei muutu.

Trammide puhul ilmneb salvesti põhiparameetrite tugev sõltuvus marsruudist. Liinil Tondi-Ülemiste (tabel 4.2, joon 4.10) paiknevad peatused tihedamalt kui liini Kopli-Kadriori (tabel 4.3, joon 4.11) algusosas, ka on viimase trass laugjam ja kulgeb pikemalt muust liiklusest eraldatud rajal.

Tabel 4.2. KT4-TÜ toitevõimsuse statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

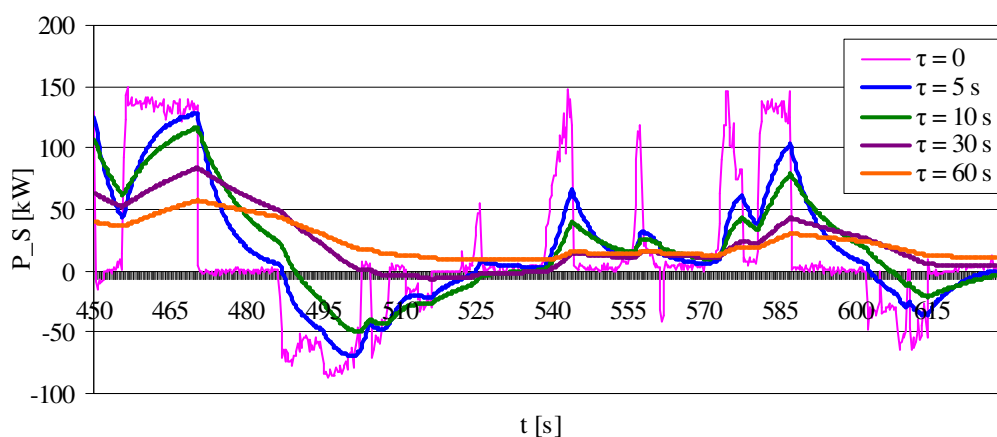
τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,13	2,67	0,33	3,40	-	-
5	0,13	1,36	0,21	6,69	242	1540
10	0,13	1,14	0,16	7,88	298	2369
30	0,13	0,67	0,08	9,37	365	3826
60	0,13	0,47	0,04	9,77	386	5072



Joonis 4.10. KT4-TÜ toitevõimsuse sõltuvus salvesti ajakonstandist

Tabel 4.3. KT4-KK toitevõimsuse statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,08	1,37	0,20	3,18	-	-
5	0,08	0,82	0,12	6,72	174	1000
10	0,08	0,73	0,09	7,89	189	1672
30	0,08	0,52	0,05	9,46	193	3156
60	0,08	0,36	0,03	10,3	202	3762

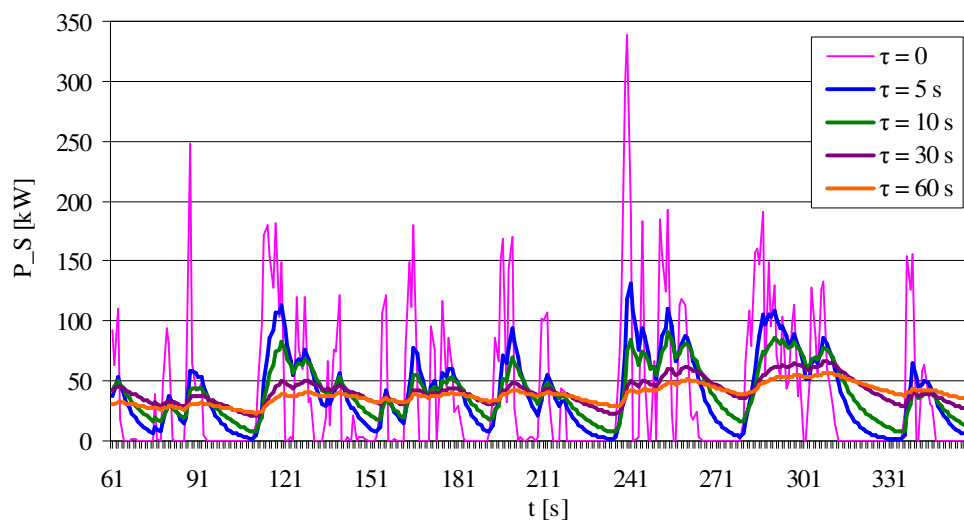


Joonis 4.11. KT4-KK toitevõimsuse sõltuvus salvesti ajakonstandist

Trolli liikumisel marsruudil Mustamäe-Kaubamaja-Mustamäe (tabel 4.4, joon 4.12) on ülekaalus mikrotsükliid, st võimsustipud kestavad vähem kui trammidel. Koormuse silumiseks vajalik energiahulk ehk salvesti mahutavus on väiksem kui vaadeldud trammidel, mida kinnitab ka asjaolu, et pardapealsed energiasalvestid ongi kasutust leidnud põhiliselt trollidel [GIZ08] [REI01].

Tabel 4.4. 14Tr-MKM toitevõimsuse statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,32	3,38	0,45	1,54	-	-
5	0,32	1,31	0,23	5,14	234	654
10	0,32	0,98	0,17	6,35	264	972
30	0,32	0,69	0,08	7,91	293	2060
60	0,32	0,60	0,05	8,00	298	3599

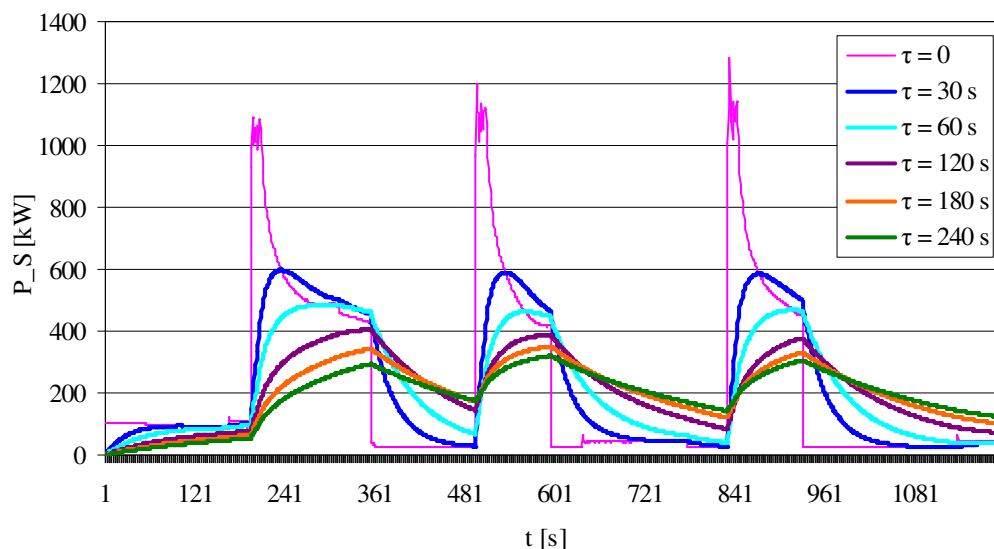


Joonis 4.12. 14Tr-MKM toitevõimsuse sõltuvus salvesti ajakonstandist

Lõigul Lagedi-Aegviidu liikunud elektrirongi koormusvõimsuse ühtlustamine eeldab salvestilt suurt võimsust ja mahutavust, mis muudab lahenduse ebarentaabliks (tabel 4.5, joon 4.13). Neljavagunilise koosseisu 2 mootorvagunit (tabel 1.7) kiirendavad rongi ebapiisavalt, seetõttu kestavad tipud kauem, samas on nende esinemissagedus väiksem. Energiasalvesti suure massi ja gabariitide tõttu on koormusvõimsuse ühtlustamine mõeldav veoalajaama tasandil [CHY06] [OPT06].

Tabel 4.5. ERIS-LA toitevõimsuse statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,12	0,81	0,13	18,0	-	-
30	0,12	0,46	0,08	30,4	1149	21904
60	0,12	0,39	0,06	35,8	1188	36987
120	0,12	0,34	0,04	39,7	1187	63118
180	0,12	0,31	0,03	41,8	1174	85855
240	0,12	0,28	0,02	44,2	1160	106317

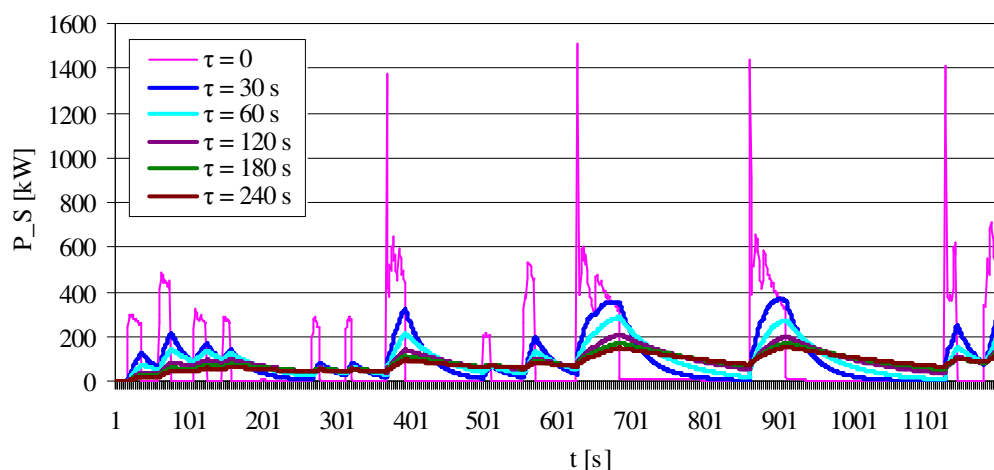


Joonis 4.13. ERIS-LA toitevõimsuse sõltuvus salvesti ajakonstandist

Liinil Paldiski-Balti jaam liikunud kuuevagonilisel rongil (tabel 4.6, joon 4.14) töötas 3 mootorvagunit (tabel 1.7), mis tagas parema dünaamika. Tippude kestused olid väiksemad, mis resulteeruvad ka vähenenud silumiseks vajaminevas energias.

Tabel 4.6. ERIS-PB toitevõimsuse statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,06	0,88	0,10	11,6	-	-
30	0,06	0,27	0,05	24,1	1968	19713
60	0,13	0,22	0,03	27,4	1968	32138
120	0,06	0,17	0,02	30,7	1951	50092
180	0,06	0,15	0,01	32,3	1945	63033
240	0,06	0,13	0,01	33,2	1942	73531

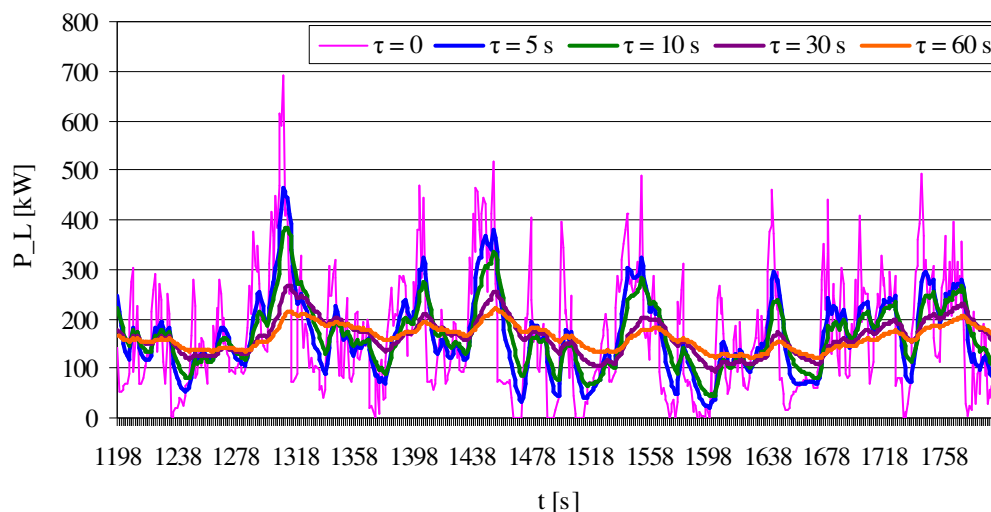


Joonis 4.14. ERIS-PB toitevõimsuse sõltuvus salvesti ajakonstandist

Sünteesides uued koormusgraafikud trammiliiklust teenindavale veolajaamale nr 4 (tabel 4.7, joon 4.15) selgub, et ajakonstandi etteantud väärtuste juures on keskpinge võrgust tarbitava võimsuse silumine mõnevõrra komplitseeritud, kuna sõidukid liiguvad erinevatel ajahetkedel erinevate võimsustega. Siiski on võimalik salvesti õige dimensioneerimisega saavutada summaarse võimsuse püsimine aktsepteeritavates piirides.

Tabel 4.7. VAJ-4 toitevõimsuse statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,07	0,29	0,05	3,59	-	-
5	0,07	0,20	0,03	6,18	299	2365
10	0,07	0,17	0,02	7,28	394	3811
30	0,07	0,12	0,01	8,49	490	5941
60	0,07	0,10	0,01	8,77	516	6921



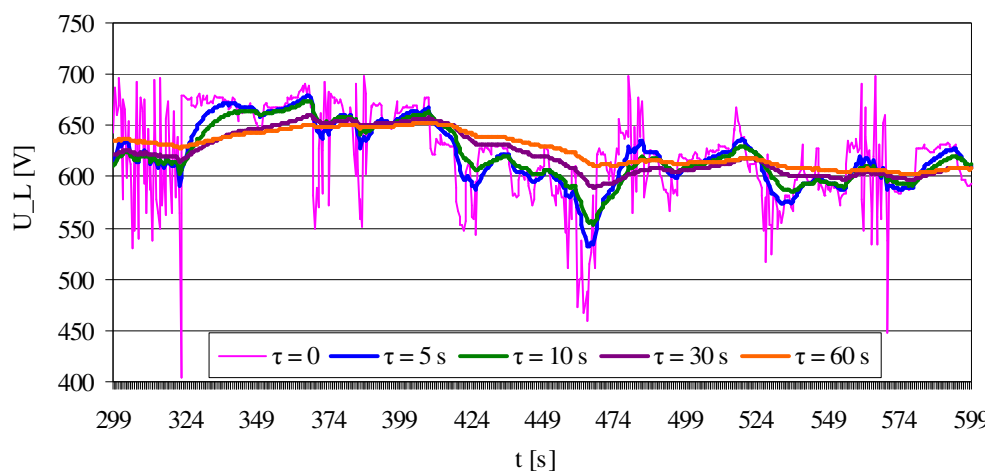
Joonis 4.15. VAJ-4 toitevõimsuse sõltuvus salvesti ajakonstandist

4.6.2 Kontaktliini pingestabiliseerimine

Toitepinge stabiliseerimiseks vajalik salvestatud energia ja võimsus on mõlema analüüsitud trammipuhul väiksemad kui liini koormuse silumisel (tabel 4.8 ja 4.9, joon 4.16 ja 4.17).

Tabel 4.8. KT4-TÜ toitepinge statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

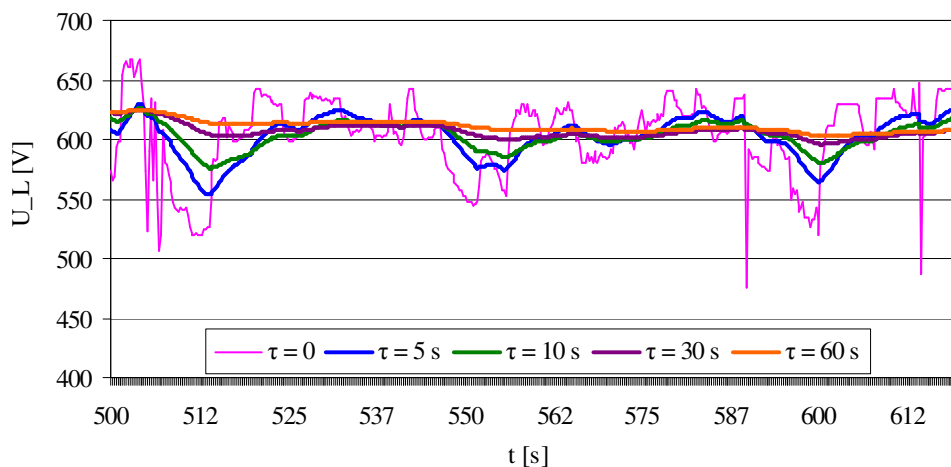
τ [s]	U_{av} [p.u.]	U_{max} [p.u.]	U_{min} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	1,04	1,21	0,67	0,05	1,57	-	-
5	1,04	1,15	0,88	0,02	6,24	55,5	1023
10	1,04	1,14	0,92	0,02	7,28	60,3	1354
30	1,04	1,13	0,97	0,01	9,33	62,5	1695
60	1,04	1,12	0,99	0,01	10,1	66,1	1776



Joonis 4.16. KT4-TÜ sisendpinge sõltuvus salvesti ajakonstandist

Tabel 4.9. KT4-KK toitepinge statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

τ [s]	U_{av} [p.u.]	U_{max} [p.u.]	U_{min} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	1,04	1,20	0,73	0,03	2,24	-	-
5	1,04	1,10	0,89	0,02	5,88	28,6	470
10	1,04	1,08	0,92	0,01	7,27	31,9	627
30	1,04	1,07	0,98	0,01	9,32	34,4	817
60	1,04	1,06	1,00	< 0,01	9,63	34,4	877



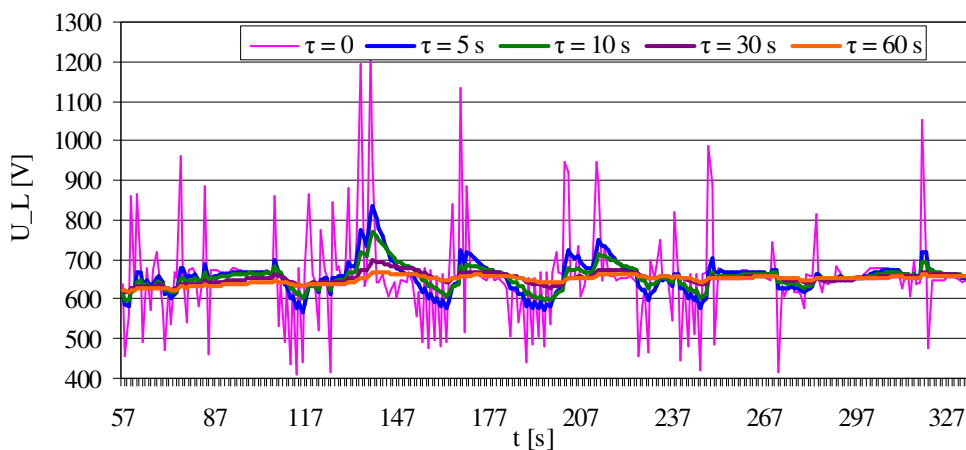
Joonis 4.17. KT4-KK sisendpinge sõltuvus salvesti ajakonstandist

Trolli puhul on probleemiks siirdeliigpinged (tabel 4.10, joon 4.18), mille allasurumine ilmestab energiasalvesti käitumist madalpääsfiltrina. Ilmnenud häiringute kõrvaldamiseks on soovitatav võtta kasutusele tõhusamad liigpingepiirikud.

Elektrirongidest rakendati arvutusmetoodikat suuremat pingelangu näidanud liini Paldiski-Tallinn valimile (tabel 4.11, joon 4.19).

Tabel 4.10. 14Tr-MKM toitepinge statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

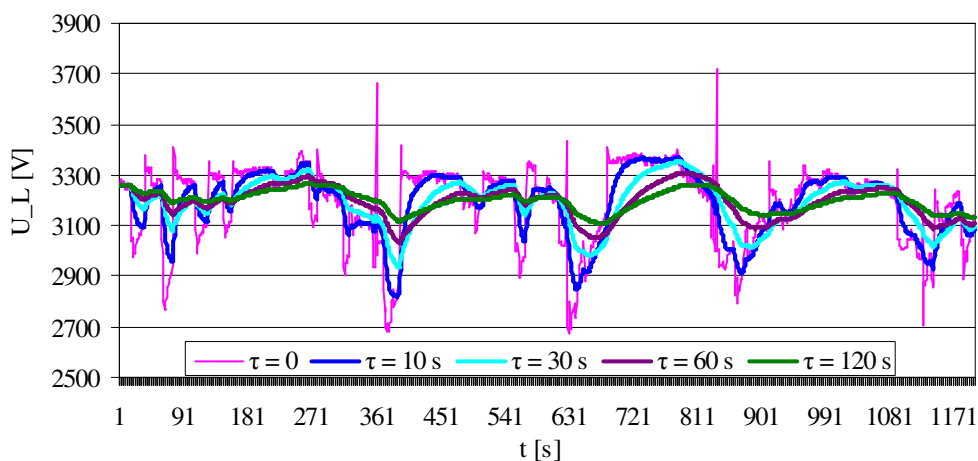
τ [s]	U_{av} [p.u.]	U_{max} [p.u.]	U_{min} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	1,07	2,08	0,63	0,18	0,36	-	-
5	1,07	1,39	0,83	0,06	4,88	119	3041
10	1,07	1,28	0,88	0,05	6,20	139	3904
30	1,07	1,18	0,95	0,02	8,00	170	4806
60	1,07	1,15	0,98	0,01	9,03	179	4971



Joonis 4.18. 14Tr-MKM sisendpinge sõltuvus salvesti ajakonstandist

Tabel 4.11. ER1S-PB toitepinge statistiliste näitajate sõltuvus ajakonstandist

τ [s]	U_{av} [p.u.]	U_{max} [p.u.]	U_{min} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	1,07	1,28	0,89	0,04	16,1	-	-
10	1,07	1,24	0,94	0,03	23,5	219	3854
30	1,07	1,18	0,98	0,02	31,8	239	10862
60	1,07	1,15	1,01	0,02	38,9	253	16396
120	1,07	1,13	1,04	0,01	42,4	261	20308



Joonis 4.19. ER1S-PB sisendpinge sõltuvus salvesti ajakonstandist

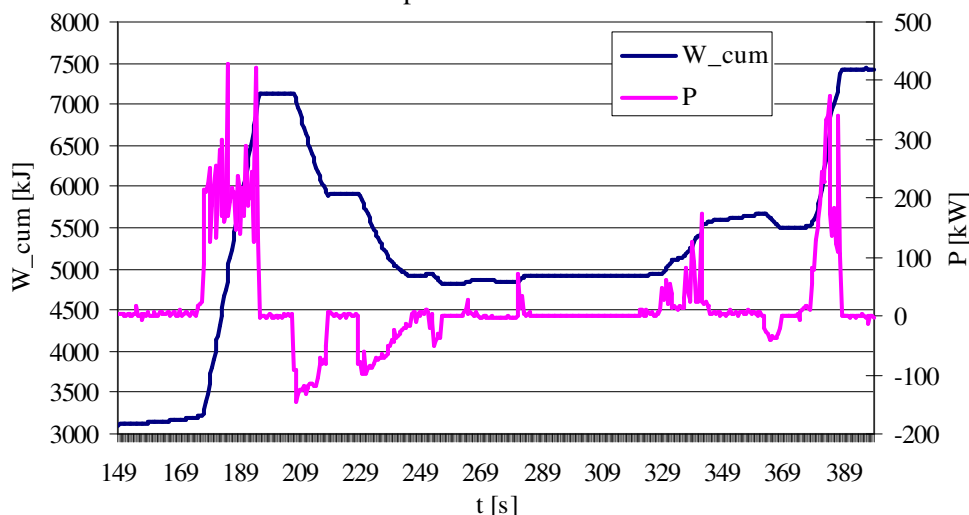
4.6.3 Pidurdusenergia taaskasutamine

Teoreetiliselt salvestatav pidurdusenergia on arvatud seosest (4.18) ja salvestusvõimsus seosest (4.19), sõidukite massid on valitud tabelist 1.7. Algiiruseks v_i on võetud aegridadest tuvastatud maksimumkiirus trassil, pöörlevate osade liikumist arvestav inertsitegur δ on valitud rööbassõidukite puhul 1,10 ja trollil 1,02 [EHS05]. Tulemused (tabel 4.12) näitavad, et pidurdusenergia efektiivne salvestamine lühikeste pidurdusaegade vältel eeldab suurt võimsust, eriti kehtib see suurel sõiduki massil ja kiirusel. Elektrirongide puhul eeldab rekuperatiivenergia võimalikult efektiivsem ära kasutamine salvestilt häid võimsuslikke näitajaid. Pidurdusaja ja -teekonna pikendamisega väheneb ka vajaminev salvestusvõimsus.

Tabel 4.12. Teoreetilised mahutavused ja võimsused pidurdusenergia salvestamiseks

Objekt	v_i [km/h]	a_e [m/s ²]	W_{ESU} [kJ]	P_{ESU} [kW]
KT4-TÜ	49,3	1,2	2608	457
KT4-KK	55,0	1,2	3245	510
14Tr-MKM	65,0	1,2	2394	318
ER1S-PB	87,0	0,6	76064	3777

Ligilähedaste tulemusteni on võimalik jõuda, analüüsid rekuperatsioonivõimelise sõiduki kumulatiivset energiatarbimist W_{cum} (joon 4.20 objekti KT4-TÜ kohta). Toodud näites tagastatakse kahes järgus vabajooksu vahefaasiga kokku 2197 kJ energiat, mis peaks vastama salvesti efektiivsele mahutavusele. Maksimaalne salvestusvõimsus ulatub väärtuseni 151 kW. Samalaadsed graafikud on koostatavad ka teiste sõidukite liikumise kohta. Kuna senine praktika näitab, et pidurdusenergia taaskasutamiseks ettenähtud salvesti peab katma umbes 1/3 kiirendusel vajatavast võimsusest [WER07], piisab võimsusest salvestusrežiimis ka tipukoormuste osaliseks katmiseks.



Joonis 4.20. Pidurdusenergia ja -võimsuse leidmine kumulatiivsest energiatarbimisest

Tuleb silmas pidada, et vaadeldud sõidukite puhul tähendab negatiivne võimsus pidurdusenergia tagastamist kontaktvõrku, kus see tarbitakse ülejäänud, mootoritalitluses töötavate sõidukite poolt. AeGRIDadest arvutatud rekuperatsioonivõimeliste trammide perspektiivsete pidurdusenergia salvestite näitajad on toodud allpool olevas tabelis 4.13. Saadud tulemused on sarnased varem kirjanduses avaldatutega [JOL02].

Tabel 4.13. AeGRIDadest arvutatud pidurdusenergia salvesti näitajad

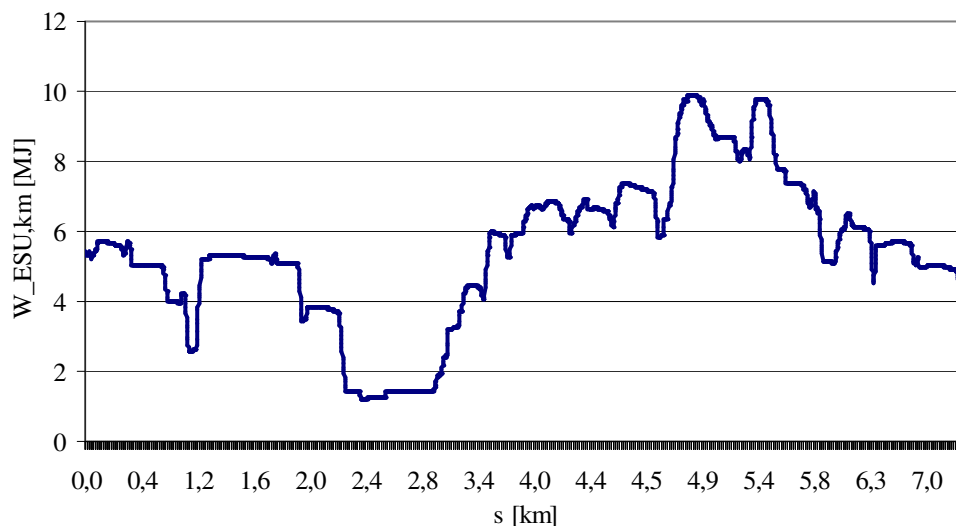
Objekt	v_i [km/h]	W_{ESU} [kJ]	P_{ESU} [kW]
KT4-TÜ	49,3	2198	151
KT4-KK	55,0	2356	161

4.6.4 Sõiduki kontaktliinivaba liikumine

Seose (4.20) alusel arvutatud mahutavused ja võimsused määratud distantsi Δs katmiseks on näidatud tabelis 4.14. Koos pidurdusenergia taaskasutamisega muutub vajatav salvestusvõime väiksemaks (joon 4.21), kuna salvesti energiapääs võib autonoomse sõidu vältel isegi suureneeda. Samalt jooniselt võib lugeda, et trammis salvesti miinimummahutavus etteantud teepikkuse kontaktliinivabaks katmiseks jääb trassi kesklinna läbivasse lõiku. Elektrirongide puhul on distants antud pikem, kuna suhteliselt lühikesi vahemaid saab läbida ka vabajooksuga.

Tabel 4.14. Energiakulud Δs läbimiseks

Objekt	Δs [km]	$W_{ESU,max}$ [kJ]	$W_{ESU,min}$ [kJ]	$W_{ESU,av}$ [kJ]	P_{ESU} [kW]
KT4-TÜ	1,0	9908	1195	5459	427
KT4-KK	1,0	7539	2546	5267	219
14Tr-MKM	1,0	8881	3273	5647	338
ER1S-PB	10	222707	89114	141207	2116



Joonis 4.21. Trammis KT4 salvesti vajalik mahutavus marsruudi Tondi-Ülemiste lõike autonoomseks katmiseks

4.6.5 Arvutatud salvesti parameetrite kokkuvõttev tabel

Allpool on toodud kokkuvõttev tabel 4.15, kus on kirjeldatud salvesti põhiparameetrid vastavalt püstitatud ülesandele. Trammide puhul on valitud ajakonstant sellisena, et toitevõimsuse silumisel oleks samaaegselt võimalik maksimaalsel määral ära kasutada regeneratiivse pidurduse käigus vabanevat energiat, st alati oleks $P_S \geq 0$ (joon 4.10 ja 4.11). Pidurdusenergia salvestamiseks vajaliku salvesti näitajad on toodud ainult rekuperatsioonivõimeliste sõidukite korral. Nagu eeldada võis, on suurima võimsuse ja energia kombinatsioon vajalik pikkade marsruudilõikude autonoomseks katmiseks. Distsantsi kontaktliinivabaks katmiseks ettenähtud salvesti mahutavus kõigub laiades piirides sõltuvalt trassi kulgemisest, kusjuures vahe suurima ja vähima energiakulu vahel võib olla isegi enam kui 8-kordne (tramm KT4 liinil Tondi-Ülemiste). Kasutatud meetodika annab vähima võimsuse pingestabiliseerimisel, sama ülesande lahendamisel on salvesti mahutavus väiksem kui liini võimsuse silumisel, va trolli puhul.

Ühe ülesande täitmiseks arvutatud parameetritega salvesti katab kas täielikult või osaliselt ka muud võimalikud funktsioonid, nt pidurdusenergia vastuvõtmise võimekusega kaasnevad ka teatud liikumisautonoomia, kontaktliini pingestabiliseerimise ja toitevõimsuse silumise efektid.

Tabel 4.15. Salvesti parameetrid vastavalt püstitatud ülesandele

Objekt	Ülesanne	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
KT4-TÜ	Võimsuse silumine, $\tau = 30$ s	365	3826
	Pingestabiliseerimine, $\tau = 10$ s	60,3	1354
	Pidurdusenergia salvestamine	151	2198
	Autonoomne sõit 1 km lõigul	max min keskmine	427 1195 5459
KT4-KK	Võimsuse silumine, $\tau = 30$ s	193	3156
	Pingestabiliseerimine, $\tau = 10$ s	31,9	627
	Pidurdusenergia salvestamine	161	2356
	Autonoomne sõit 1 km lõigul	max min keskmine	219 7539 2546 5267
14Tr-MKM	Võimsuse silumine, $\tau = 5$ s	234	654
	Pingestabiliseerimine, $\tau = 10$ s	139	3904
	Autonoomne sõit 1 km lõigul	max min keskmine	338 8881 3273 5647
ER1S-PB	Võimsuse silumine, $\tau = 30$ s	1968	19713
	Pingestabiliseerimine, $\tau = 10$ s	219	3854
	Autonoomne sõit 10 km lõigul	max min keskmine	2116 222707 89114 141207
ER1S-LA	Võimsuse silumine, $\tau = 30$ s	1149	21904
VAJ-4	Võimsuse silumine, $\tau = 10$ s	394	3811

4.7 Ülikondensaatorsalvesti dimensioneerimine

Dimensioneerimiseks tuleb esmalt määratleda nõuded kasutatavale ülikondensaatorpatarele. Valitud patarei peab olema suuteline

- 1) salvestama püstitatud ülesande täitmiseks vajaliku energiahulga W_{ESU} ,
- 2) taluma lühiajalist koormust P_{ESU} ,
- 3) taluma klemmipinget kuni $U_{ESU,N}$.

Ülikondensaatorpatarei summaarse C_{Σ} mahtuvuse saab leida vajatavast energiahulgast, nimipingest $U_{ESU,N}$ ja laetusastmete piirkonnast $SOC_{max} \dots SOC_{min}$. Kuna pinget tõstva ja alandava muunduriga komplekteeritud kondensaatorpatarei puhul $SOC_{max} = 1$ ja $SOC_{min} = 0,5$, tuleb mahtuvuseks

$$C_{\Sigma} = \frac{2 \cdot W_{ESU}}{0,75 \cdot U_{ESU,N}^2} \quad (4.23)$$

Järgmisena tuleb leida kondensaatorpatarei suurus, st rööbiti ja jadamisi ühendatud kondensaatorite kogused n_p, n_s . Ülikondensaatorite arvu jadaahelas saab, ümardades patarei klemmipinget $U_{ESU,N}$ ja kondensaatori nimipinget $U_{UC,N}$ suhte lähima suurema täisarvuni

$$n_s = \left\lceil \frac{U_{ESU,N}}{U_{UC,N}} \right\rceil \quad (4.24)$$

Edasi on võimalik arvutada ülikondensaatori vajalik mahtuvus

$$C = C_{\Sigma} \cdot \frac{n_s}{n_p} \quad (4.25)$$

Ülikondensaatorite arv patareis kokku

$$n_{UC} = n_s \cdot n_p \quad (4.26)$$

Rööpahelate arvu n_p , saab leida iteratsioonimeetodil, so võrreldes arvutatud C_{UC} väärtust tootjate nomenklatuuris saadaolevate ülikondensaatorite mahtuvustega. Arvutusnäidetes kasutatud kondensaatorite parameetrid on loetletud tabelis 4.16, kus R_{ESR} tähendab sisetakistust, I_{pk} suurimat voolu 1 s vältel, I_{cont} lubatavat pidevvoolu ja m massi. Kuna ülikondensaatoreid toodetakse ainult kindlate mahtuvustega, kujuneb moodustatud patarei enamasti üledimensioneerituks.

Tabel 4.16. Arvutuste aluseks olevad ülikondensaatorid

Tüübitähis	$U_{UC,N}$ [V]	C_{UC} [F]	R_{ESR} [mΩ]	I_{pk} [A]	I_{cont} [A]	m [kg]
BCAP1500 P270	2,7	1500	0,47	2000	115	0,32
BCAP2000 P270	2,7	2000	0,35	2700	125	0,4
BCAP3000 P270	2,7	3000	0,29	4000	150	0,55

Raudteeveeremi puhul eelistatakse pidurdusenergia salvestamise juures tänapäeval hooratassalvesteid [RIC02] [THE03], mis on suurte võimsuste ja energiatega juures ülikondensaatorpatareidest rentaablimad. Seetõttu analüüsitakse järgnevalt ainult kergrööbastranspordile ja trollibussidele sobivate salvestite ülikondensaatoreid. Kondensaatorpatarei nimipinget tuleb valida võrgu

enamlevinud pingevahemikust madalam, vältimaks juhitatuid energiavooge läbi jõuliidese vabavooludiodi (joon 3.5). Kõikide kondensaatorite puhul kehtivad järgmised algandmed:

- 1) $U_{ESU,N} = 480 \text{ V}$;
- 2) $n_s = \lceil 480 / 2,7 \rceil = 178$.

Kondensaatorite arvestuslikud kogused on näidatud allolevas tabelis 4.17.

Tabel 4.17. Kondensaatorite arv rakenduspoõhiselt

Objekt	C_{Σ} [F]	n_p			n_{UC}		
		1500	2000	3000	1500	2000	3000
KT4-TÜ							
Võimsuse silumine, $\tau = 30 \text{ s}$	44,3	6	4	3	1068	712	534
Pinge stab, $\tau = 10 \text{ s}$	15,7	2	2	1	356	356	178
Pidurdusenergia salvestamine	25,4	3	3	2	534	534	356
Autonoomne sõit 1 km lõigul, min	13,8	2	2	1	356	356	178
KT4-KK							
Võimsuse silumine, $\tau = 30 \text{ s}$	36,5	5	3	2	890	534	356
Pinge stab, $\tau = 10 \text{ s}$	7,26	1	1	1	178	178	178
Pidurdusenergia salvestamine	27,2	3	3	2	534	534	356
Autonoomne sõit 1 km lõigul, min	29,5	4	3	2	712	534	356
14Tr-MKM							
Võimsuse silumine, $\tau = 5 \text{ s}$	7,57	1	1	1	178	178	178
Pinge stab, $\tau = 10 \text{ s}$	45,2	6	4	3	1068	712	534
Autonoomne sõit 1 km lõigul, min	37,9	5	4	2	890	712	356
VAJ-4							
Võimsuse silumine, $\tau = 10 \text{ s}$	44,1	5	4	3	890	712	534

Ülikondensaatorpatarei mass jääb vastavalt kasutatava kondensaatori tüübile ja nende koguarvule n_{UC} piiridesse 57 kg...342 kg. Tabelis 2.6 väljendatud massivõimsuse alusel kujuneb salve võimsuseks seega 428 kW...2,57 MW, mis vastavad püstitatud ülesannete tingimustele.

4.8 Energiasalvesti majandusliku tasuvuse arvutus

3. ja 4. põlvkonna rekuperatiivpidurdust võimaldavate sõidukite pardapealse energiasalvesti puhul seisneb põhiline eelis kontaktliinist tarbitava energia kokkuhoius, kuna on võimalik taaskasutada pidurdusenergiat. Liinikoormuse silumine ja pinge stabiliseerimine aitavad vähendada elektrienergia ülekandega kaasnevaid kadusid, mille hindamiseks on vaja läbi viia täiendavaid arvutusi ja

modelleerimisi. Veoalajaama paigutatud salvesti silub keskpingevõrgust tarbitavat võimsust, mistõttu võib säästa peakaitsme alusel makstava ampritasu pealt.

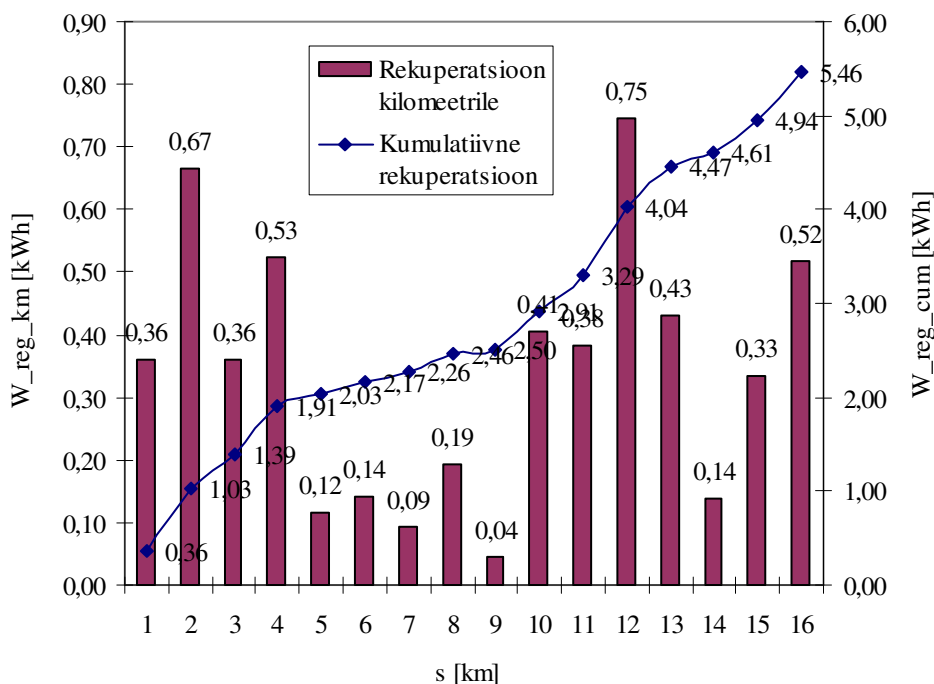
Majandusliku tasuvuse näidetena on toodud ülikondensaatorpatareiga salvesti

- 1) liinil Tondi-Ülemiste uuritud trammile KT4 (tabel 4.17),
- 2) veoalajaamale nr 4 (tabel 4.17).

4.8.1 Energiasalvesti tasuvusaeg sõiduki pardal

Kuna uuritud trammide KT4 veoajami muunduriosa juba sisaldab perspektiivse energiasalvesti teenindamiseks mõeldud poolsilda, tuleb arvestada suuremas jaos ainult ülikondensaatorite ja nende lisatarvikute maksumusega. 3000 F mahtuvusega kondensaatori turuhinnaks on hetkeseisuga 660 kr, millele lisandub 6 jadaühenduses kondensaatori pingeuhtlustusmoodul hinnaga 642 kr. Liinikoormuse uhtlustamiseks ja pidurdusenergia täielikuks salvestamiseks vajalik kondensaatorpatarei maksaks siis kokku $356 \cdot 660 \text{ kr} + 60 \cdot 642 \text{ kr} = 273480 \text{ kr}$.

Ringil Tondi-Ülemiste-Tondi tagastas vaadeldud tramm võrku kokku 5,46 kWh energiat (joon 4.22). Kuna tramm läbib sama ringi 5 korda ööpäevas ja arvestuslikult 350 päeval aastas, on ideaalsel juhul aastane elektrienergia kokkuhoid $5,46 \cdot 5 \cdot 350 = 9555 \text{ kWh}$. Elektrienergia põhitariifil 1,30 kr/kWh tuleks rahaliseks säästuks aastas $9555 \cdot 1,30 = 12421,50 \text{ kr}$. *Tasuvusajaks tuleb praeguste energia- ja kondensaatorite hindade ning liiklustiheduse juures seega 22 aastat.*



Joonis 4.22. Energia tagastus Tondi-Ülemiste-Tondi trammiliinil

4.8.2 Veoalajaama statsionaarse energiasalvesti tasuvusaja arvutus

Veoalajaama nr 4 paigutatav ülikondensaatorsalvesti (tabel 4.17), mille algseks eesmärgiks on keskpingevõrgust tarbitava võimsuse silumine, on rakendatav ka pidurdusenergia salvestamisel. Käsitlev veoalajaam toidab liinilõiku peatuste *Paberi* ja *Majaka põik* vahel edasi- ja tagasisuunal vastavalt kilomeetritel 5...7 ja 10...12 (joon 4.22), mida läbivad ka marsruudil Tondi-Ülemiste-Tondi sõitvad trammid. Sõiduki poolt tagastatav energia võrku teenindavatel lõikudel on kokku 1,89 kWh. Kehtiva sõiduplaani kohaselt läbib veoalajaama teeninduspiirkonda ööpäevas keskmiselt 140 trammi, eeldades neilt kõigilt sarnast dünaamikat ja rekuperatsioonivõimet, tuleks aastaseks säästetavaks energiaks kokku $1,89 \cdot 140 \cdot 365 = 96579$ kWh, rahalises väljenduses $96579 \cdot 1,30 = 125552,70$ kr. Kondensaatorpatarei maksumus koostatuna 3000 F elementidest tuleb $534 \cdot 660$ kr $+90 \cdot 642$ kr = 410220 kr. Eeldades, et kondensaatorsalve liidesed maksavad samapalju kui salv ise, *kujuneb tasuvusajaks 6,5 aastat*. Lisandub veel ampritasu vähenemisest tulenev majanduslik efekt, kuna suurim võimsus kahaneb 1,7 korda (tabel 4.7).

Muid asjaolusid arvestamata (kadude minimeerimine kontaktliinides, kontaktliinide kulumise vähendamine jne) *on kasutatud meetodika alusel kõige tasuvam paigutada energiasalvesti veoalajaama*, kus kasutustegur ja energiasäästu efekt on maksimaalsed.

4.9 Kasutatud arvutusmeetodika SWOT analüüs

Tugevused:

- 1) arvutused on suhteliselt lihtsad ega vaja spetsiaalset tarkvara;
- 2) meetodid on rakendatavad nii sõidukitele kui veoalajaamadele.

Nõrkused:

- 1) meetodika kehtib konkreetsele sõidukile kindlal marsruudil, representatiivsuse tagamiseks peab sooritama mõõtmisi mitmeid kordi erinevatel tingimustel, sama kehtib ka veoalajaamade kohta;
- 2) energiasalvesti käsitlemisel filtrina tehakse mitmeid lihtsustusi, mis mõjutavad tulemuste täpsust.

Võimalused:

- 1) salvesti arvutusmeetod on rakendatav ka väljaspool elektertranspordi valdkonda, kus energia tootmine või tarbimine on muutliku iseloomuga;
- 2) kui mõõtmistulemuste asemel kasutada modelleerimistulemusi, saab arvutusi läbi viia ka projekteeritava elektertranspordisüsteemi jaoks, integreerides algoritmi vastavasse tarkvarapaketti.

Ohud:

- 1) arvustehnika areng võib muuta kasutatud meetodi aegunuks, kuna piisava arvutusvõimsuse ja algandmete hulga juures saab projekteerimisel arvesse võtta rohkem energiyvahetusel toimivaid faktoreid [ADI98];
- 2) kasutatud arvutusmeetodid annavad suurema mahutavuse kui varasematel lihtsustustel [LEH08], seetõttu eksisteerib oht nende ignoreerimiseks majandusliku ebaatraktiivsuse tõttu.

5 Energiasalvesti topoloogiad ja arvutusmeetodid väikepingelistele abiahelatele

5.1 Kergrööbassõiduki väikepingeliste ahelate kirjeldus

Trammi väikepingelisi ahelaid toidetakse normaaltalitluses läbi pardapealse abitoitemuunduri (APS). Trammi väikepingeliste tarbijate hulgas leidub rida selliseid, mille talitlusest sõltub sõiduki ohutus ja liikumisvõime; nendest tuleb eeskätt märkida pidureid ja valgustust.

Sõiduki APS peab olema suuteline varustama püsiva iseloomuga tarbijaid keskmise koormusvooluga ja samas katma ka võimsustippe, mida põhjustavad vastava iseloomuga tarbijad. Seetõttu on üks APS-le esitatavatest nõuetest lühiajaline ülekoormuse taluvus [VIN06]. Paljud abiahelad peavad säilitama oma funktsionaalsuse ka lühiajaliste toitepinge katkestuste korral, eriti puudutab see ohutust ja juhtimist tagavaid süsteeme. Sellised katkestused võivad tekkida juhul, kui sõiduk läbib pingetuid kontaktliini lõike liinilahutite või ristumiste all ning APS rikke korral. Mainitud juhtudel tagab väikepingelise elektrivarustuse varutoiteallikas, mille moodustab reeglina akupatarei. Pärast APS sisendpinge taastumist algab vahepeal tühjenenud akupatarei laadimine. Kaheliigiliste tarbijate olemasolu eeldab varutoiteallikalt nii piisavat erienergiat konstantse iseloomuga tarbijate toitmiseks (valgustus, reisijainfosüsteemid jne) kui ka suurt erivõimsust lühiajaliste suure võimsusega seadmete tarbeks, nagu ukseajamid ja elektromagnetilised rööpapidurid. Suure lühiajalise võimsusega tarbijate avariienegiavarustuse tagamine on paljude kergrööbassõidukeid käitavate ettevõtete puhul osutunud komplitseerituks, sest mitmed uurimused on näidanud, et just akupatarei on vanade ja isegi uute sõidukite väikepingeliste ahelate nõrgim lüli. Kuna aku sisetakistus kasvab koos temperatuuri langemisega, väheneb selle tootlikkus oluliselt, mis võib muuta võimatuks taaslaadimise. Kuna akude töökindlus vananedes langeb, tuleb neid regulaarselt uuendada, kuid tegelikult eksploateeritakse neid sageli üle mitmekordselt. Ebatöökindel akupatarei tähendab seda, et toitepinge katkemisel pole sõiduki juhil liiklusohutlikus situatsioonis võimalust peatada sõidukit avariipiduri abil, milleks kergrööbassõidukitel on elektromagnetiline rööpapidur. Nii rikutakse raudteeseadmetele esitatavaid töökindluse, kasutatavuse, korrashoiu ja ohutuse (RAMS) rahvusvahelisi nõudeid, mis reeglina toob operaatorfirmale kaasa tõsiseid sanktsioone.

5.2 Varutoiteallikas

Trammide KT4 olemasolev akupatarei on koostatud kas 17 või 18 NiCd elemendist nimipingega 1,2 V (tabel 5.1). Trammide ehitamise ajal oli selline akutüüp ainus, mis rahuldab nii erienergiale kui erivõimsusele esitatavaid nõudmisi. Analoogseid akusid varieeruvate tüübitähistega kasutatakse ka Škoda tehases valmistatud trollibussides 14Tr ja 15Tr.

TTTK bilansis olevate trammide akupatareid on paigaldatud enamasti enne 1991. aastat ja seega ületanud oma ettenähtud tööea, mis väljendub suurenenud

sisetakistuses ja vähenenud mahutavuses. Uute, 4. põlvkonna trollide varutoiteallikaks on geel-tüüpi pliiakud, mis, vaatamata oma väiksemale erivõimsusele, on NiCd akudega võrreldes väiksema maksumusega ja keskkonnasõbralikumad.

Tabel 5.1. Trammi KT4 NiCd akupatarei põhinäitajad

Näitaja	Element	Patarei	
Tüübitähis	NK-125	17 elementi	18 elementi
Nimipinge [V]	1,2	20,4	21,6
Minimaalpinge [V]	1,0	17	18
Laadimispinge puhverrežiimis [V]	1,4	24	25
Mahutavus [Ah]	125		
100 % laetud aku sisetakistus [mΩ]	0,32	5,44	5,76
Talitustemperatuuride vahemik [°C]	-40...+40		
Ettenähtud tööiga	10 aastat		

5.3 Koostoimeline väikepingeline salvesti

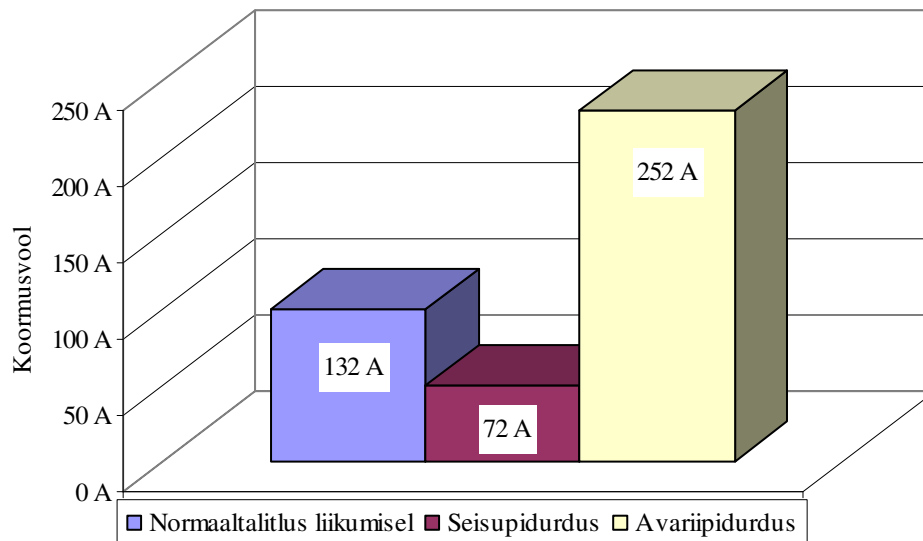
Sõiduki pardapealse varutoiteallika erivõimsuse parandamiseks on võimalik kombineerida olemasoleva akupatareiga ülikondensaatorid, mis tagavad tipuvõimsuste katmise. Töökindluse ja toimekiiruse tagamiseks puuduvad süsteemis pinget tõstvad ja vähendavad muundurid; sarnaseid lahendusi leiab sise põlemismootorite käivitamist käsitlevatest kirjutistest [BOIO2].

5.3.1 Väikepingeliste ahelate koormusvoolude analüüs

Kergrööbassõiduki liikumisel linna liiklustersüklis pole erinevate väikepingeahelate lülitamine täpselt prognoositav. Edasise arutluskäigu lihtsustamiseks saab sõiduki liikumistsükli jaotada kolmeks põhitalitluseks:

- 1) normaaltalitus liikumisel, kus küte on välja lülitatud, klotspidurid rakendamata, sõidutuled ja valgustus põlevad;
- 2) seisupidurdus peatustes, kus klotspidurid on rakendatud, muud abiahelad nagu punktis 1);
- 3) avariipidurdus rööpapiduri käitamisega, rakenduvad ka klotspidurid, muud abiahelad nagu punktis 1).

Trammi KT4 elektromagnetiline klotspidur töötab toitepinge kadumisele, st normaaltalitluses on see pidevalt pingestatud ja solenoidi mähist läbib hoidevool. Trammi KT4 eelkirjeldatud põhitalitluste keskmised koormusvoolud on kuvatud joon 5.1.



Joonis 5.1. Väikepeingeliste ahelate koormusvoolud erinevatel põhitalitlustel

5.4 Rööpapiduri efektiivsuse tõstmise meetod

5.4.1 Rööpapiduri tööpõhimõte

Elektromagnetiline rööpapidur toimib sõltumatult seisupidurina kasutatavatest klotspiduritest, mille efektiivsus sõltub suurel määral rööbastee olukorrast. Rööpapidur surutakse vastu rööbast tänu tõmbejõule, mille indutseerib elektromagneti mähist läbiv vool. Elektromagneti tõmbejõud koos rööpa ja rööpapiduri friktsioonkatte vahelise hõõrdejõuga määrab omakorda sõiduki pidurdusjõu. Friktsioonkatete ja rööpa pinna intensiivse kulumise tõttu kasutatakse rööpapidureid reeglina ainult hädaolukordades, kui aeglustus omandab suurima lubatava väärtuse. Häda- ehk avariipidurdusel rakenduvad üheaegselt nii dünaamilised, seisu- kui rööpapidurid [EVS05]; pärast aeglustamist teatud miinimumkiiruseni, viimased vabastatakse, vältimaks järske tõukeid ja klotside tarbetut kulumist.

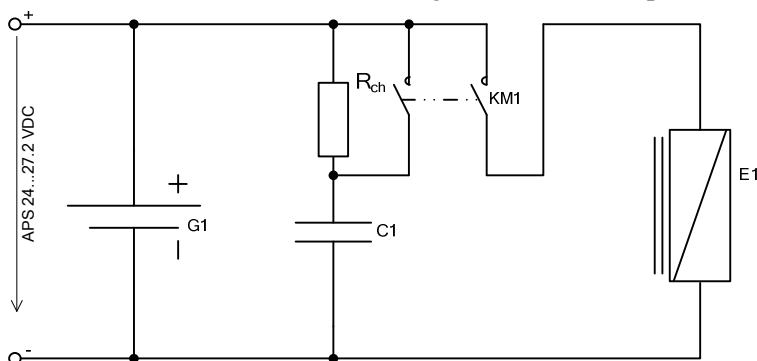
Rööpapiduri elektromagneti tõmbejõud F_{br} on arvutatav seosest [VAN93]:

$$F_{br} = \frac{\mu_{br} \cdot n_{br}^2 \cdot I_{br}^2 \cdot A_{br}}{2 \cdot \mu_0 \cdot l_{br}}, \quad (5.1)$$

kus μ_{br} on elektromagneti südamiku suhteline magnetiline läbitavus, n_{br} - mähise keerdude arv, I_{br} - rööpapiduri mähist läbiv vool, A_{br} - südamiku ristlõike pindala, μ_0 - vaakumi magnetiline läbitavus ja l_{br} - magnetahela keskmine pikkus. Siit järeldub, et magnetimiskõvera lineaarses piirkonnas sõltub pidurdusjõud rööpapiduri elektromagneti mähist läbiva voolu ruudust, mis on omakorda määratud toitepingega U_{aux} .

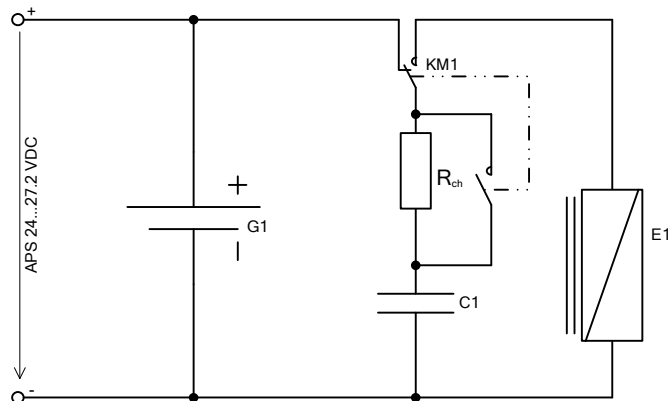
5.4.2 Aku- ja ülikondensaatorpatarei ühendusviisid

Alalisvoolumuundurita ehk passiivse lahenduse korral eksisteerib kolm põhilist aku- ja ülikondensaatorpatarei ühendusviisi. Kõige lihtsam neist, mis eeldab olemasolevate ahelate vähimat ümberkonfigureerimist, on ülikondensaatorpatarei C1, akupatarei G1 ja tipukoormuse tarbija E1 rööpühendus (joon 5.2). Ülikondensaatori laadimisvoolu piiramiseks saab kasutada eeltakistit R_{ch} , mis lühistatakse tühjenemise ajaks möödaviigukontakti KM1 abil. Piisavalt suure ühendusjuhtmete takistuse ja akupatarei sisetakistuse korral võib eeltakisti skeemist ka puududa. Taolise koostoimelise energiasalvesti tühjenemisel jaotuvad voolud kahe allika vahel vastavalt nende sisetakistusele ja jääkmahutavusele; taoline skeem on ratsionaalne mitmete eriaegselt lülitatavate tipukoormuste toiteks.



Joonis 5.2. Aku- ja ülikondensaatorpatarei rööpühendus [SHA08]

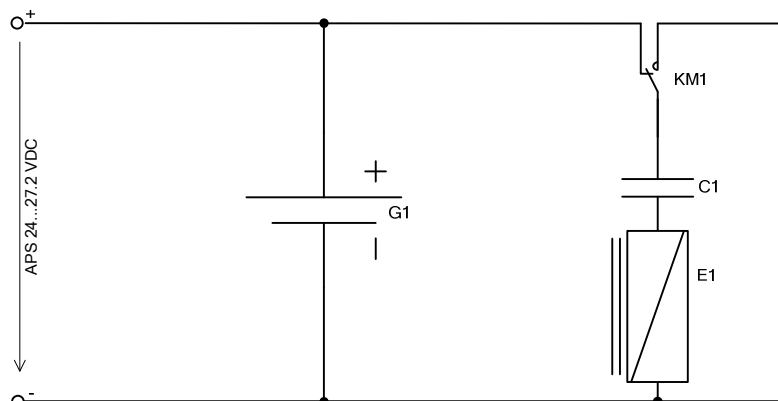
Kui tipuvõimsuse tarbijatel, nt rööpapiduritel, on igapähe omaette ülikondensaatoritugi, võib nende käitamisel põhitoite APS-st ja akupatareist lahutada (joon 5.3), mille tulemusena toidetakse määratud tarbijat ainult ülikondensaatorist. Nagu rööpühenduse korral, võib siingi eeltakistist R_{ch} teatud tingimustel loobuda.



Joonis 5.3. Skeem primaarallika lahutamiseks [BOI02]

Kolmas võimalus on kasutada ümberlülitusega skeemi, kus tipukoormus E1 on normaalolekus ülikondensaatorpatareiga C1 jadaühenduses (joon 5.4) ja

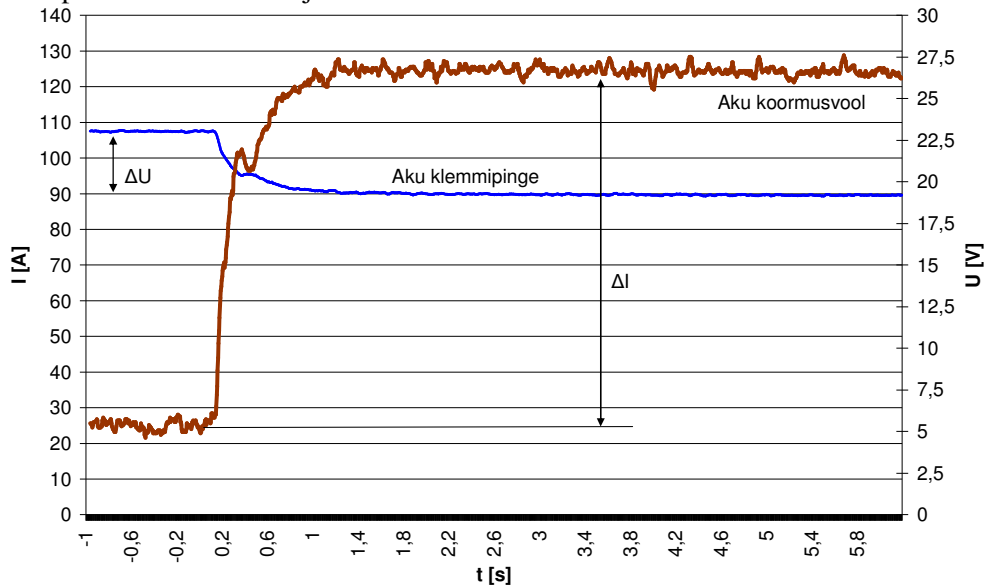
laadimisvoolu piirab täiendavalt ka koormuse takistus. Peale KM1 ümberkommuterimist liigub tühjenemisvool läbi moodustunud kontuuri C1-KM1-E1, millest muud toiteallikad jäävad eraldatuks.



Joonis 5.4. Tipukoormuse toide jada-rööp ümberlülitusega [REN98]

5.4.3 Rööppapiduri koostoimelise varutoiteallika näide

Pakutud koostoimelise varutoiteallika efektiivsuse hindamiseks viidi TTTK depoo territooriumil läbi rida katsetusi, esimeseks neist oli rööppapiduri käitamine ainult pardapealselt akupatareilt. Saadud voolu ja pinget kõverad (joon 5.5) on aluseks edaspidistele arvutustele ja simulatsioonidele.



Joonis 5.5. Akupatarei koormusvoolu ja klemmpinge muutumine avariipidurduse vältel

Järgnevana arvutame akupatarei tegeliku sisetakistuse R_{bat} :

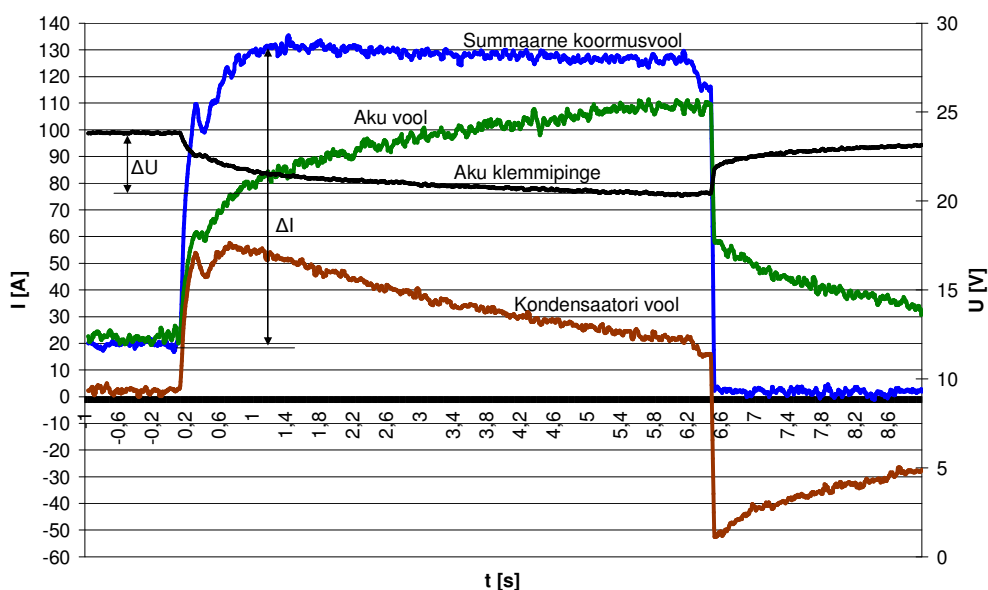
$$R_{bat} = \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad (5.2)$$

kus ΔU on akupatarei klemmpinge muut koormuse rakendamise tagajärjel ja ΔI koormusvoolu muut. Joon 5.5 selgub, et, $\Delta U = 3,8$ V and $\Delta I = 99$ A, seega $R_{bat} = 38,3$ m Ω . Viimane väärtus ületab tunduvalt tabelis 5.1 defineeritud, mille põhjusteks võib olla kas akupatarei vanus (~20 aastat) või katse läbiviimise ajal valitsenud temperatuur +5 °C. Samuti ei jõua rööpapiduri vool joon 5.1 kirjeldatud väärtuste lähedalegi.

Teises katses ühendati akupatareiga rööbiti kahest ülikondensaatorist moodustatud tugiallikas, mille andmed on toodud tabelis 5.2. Katse tulemused on näidatud kõveratena joon 5.6. Nagu näha, vähenes mõnevõrra pingemuut, mis nüüd on $\Delta U = 3,4$ V, samas suurenes väljundvool: $\Delta I = 112$ A.

Tabel 5.2. Katsetatud ülikondensaatoripatarei parameetrid

Näitaja	Moodul	Patarei
Tüübitähis	PCM14014	
Nimipinge [V]	14	28
Mahtuvus [F]	150	75
Sisetakistus [m Ω]	12,2	24,4
Kasutatav energia [Wh]	2,82	5,64



Joonis 5.6. Mõõdetud voolud ja pinge rööpapiduri käitamisel katselise ülikondensaatoriga

Arvutuste lihtsustamiseks võib rööpapidureid kirjeldada ekvivalentse RL lülina, mida iseloomustavad summaarne takistus R_{br} ja summaarne induktiivsus L_{br} .

$$R_{br} = \frac{U_2}{I_2} - R_{bat}, \quad (5.3)$$

kus U_2 ja I_2 on vastavalt akupatarei klemmipinge ja koormusvool tipuvõimsusel. Parameetritele väärtuste omistamise järel saame $R_{br}=120\text{ m}\Omega$, mis sisaldab ka ühendusjuhtmete takistust. Toiteallika sisetakistuse puudumisel oleks ideaalne pidurdusvool I_{br} tunduvalt suurem ja sõltuks ainult elektromagneti mähise takistusest R_{br} ja väikepingesüsteemi nimipingest $U_{aux,N}$. Ohmi seaduse alusel oleks ideaalne pidurdusvool nimipingel $I_{br} = 200\text{ A}$.

Rööapidurite summaarne induktiivsus L_{br} on leitav seosest

$$L_{br} = \tau \cdot R_{br}, \quad (5.4)$$

kus $\tau = 0,4\text{ s}$ on RL-ahela ajakonstant, võetuna jooniselt 5.5.

5.4.4 Rööapiduri koostoimelise energiasalvesti arvutusmeetod

Avariipidurdus rööapiduriga on kiiretoimeline protsess kestusega mitte üle 6 s, mille intensiivsust piirab maksimaalne lubatav aeglustus $2,75\text{ m/s}^2$ [EVS05]. Koostoimeline energiasalvesti peab olema kavandatud sellisena, et tipuvõimsuse tarbijate toide oleks tagatud ilma pinge langemiseta alla lubatava miinimumi.

APS väljundpinge on väikepinge nimiväärtusest mõnevõrra kõrgem, kompenseerimaks pikkades ühendusjuhtmetes tekkivaid pingelangusid ja lubamaks akupatarei laadimist. Avariipidurduse vältel rööapidurite tarbitav energia

$$W_{br} = U_{aux,N} \cdot I_{br} \cdot t_{br}, \quad (5.5)$$

kus $U_{aux,N}$ on abipinge nimiväärtus ja t_{br} avariipidurduse kestus. Arvestades maksimaalseks avariipidurduse kestuseks $t_{br} = 6\text{ s}$, on rööapidurite energiakulu $W_{br} = 28,8\text{ kJ}$.

Koormustipu katmiseks vajalik ülikondensaatorpatarei mahtuvus

$$C = \frac{2 \cdot W_{br}}{U_{aux,N}^2 - U_{aux,min}^2}, \quad (5.6)$$

kus $U_{aux,min}$ on abitoitepinge lühiajaline lubatav miinimumväärtus. Standardi [EVS07] kohaselt $U_{aux,min} = 17\text{ V}$, seega $C = 200\text{ F}$.

5.4.5 Ülikondensaator moodulite valikumudel

Antud rakendusele sobivad BMOD0500 P016 moodulid, mida toodab Maxwell Technologies (tabel 5.3). Vajaliku klemmipinge ja mahtuvuse saavutamiseks kasutatakse patareis kahe mooduli jadaihendust.

Tabel 5.3. BMOD0500 P016 ülikondensaator moodulite põhinäitajad

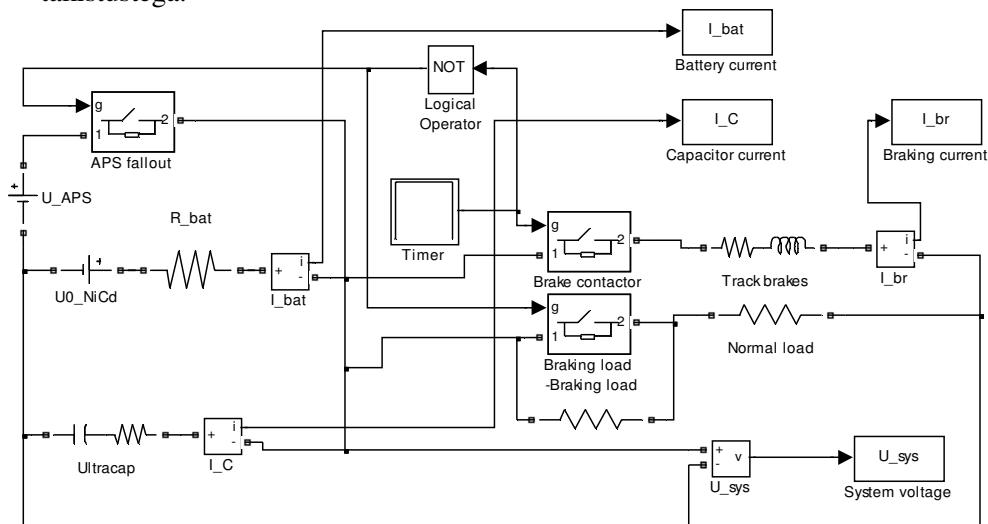
Näitaja	Moodul	Patarei
Nimipinge [V]	16,2	32,4
Mahtuvus [F]	500	250
Sisetakistus [mΩ]	2,4	4,8
Erienergia [W·h/kg]	3,17	
Eri võimsus [W/kg]	6700	

Üldise massiga 11,5 kg ja gabariitmõõtmega 416 mm x 134 mm x 157 mm (PxLxK) pole ülikondensaatorite osakaal koostoimelises salvestis akupatareiga kuigi märkimisväärne ega mõjuta oluliselt sõiduki massi ega vaba ruumi.

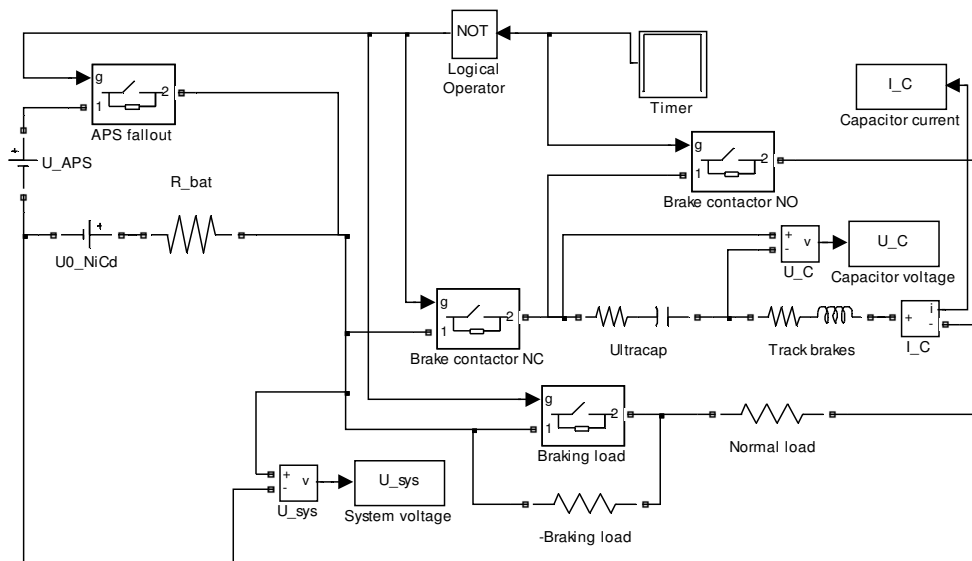
5.4.6 Simulatsioonid ja nende tulemuste analüüs

Arvutustulemuste paikapidavuse kinnitamiseks koostati simulatsioonimudelid, kasutades selleks *MATLAB Simulink SimPowerSystems* teegis leitud plokke. Pideva rööpühenduse (joon 5.2) ja jada-rööp ümberlülituse (joon 5.4) simulatsioonimudelid on kujutatud vastavalt joon 5.7 ja 5.8. Mudelite puhul viidi sisse järgmised lihtsustused ja asendused:

- 1) ülikondensaatorpatarei on esitatud mahtvusliku elemendi ja sisetakistuse jadaühendusena vastavalt tabelis 5.3 toodud väärtustele;
- 2) rööpapidurid on kujutatud RL-lülina, mille parameetrite väärtused on arvatud eelnevas alapunktis;
- 3) NiCd akupatarei on esitatud ideaalse pingellika ja sisetakistuse jadaühendusena. Taolist lihtsustust lubab sisse viia asjaolu, et avariipidurdusele kuluv energia moodustab vaid tühise osa akupatarei mahtvusest, mistõttu laetusaste energiavahetuse vältel oluliselt ei muutu [MIE06];
- 4) APS koos akupatareini viiva juhistikuga on asendatud ideaalse alalispingeallikaga $U_{APS}=26,4\text{ V}$ ja jadatakistusega, nii et resulteeruv akupatarei klemmipinge normaaltalitusel (joon 5.1) vastab 24 V;
- 5) muud koormused liikumisel ja avariipidurdusel on esitatud ekvivalentsete takistustega.



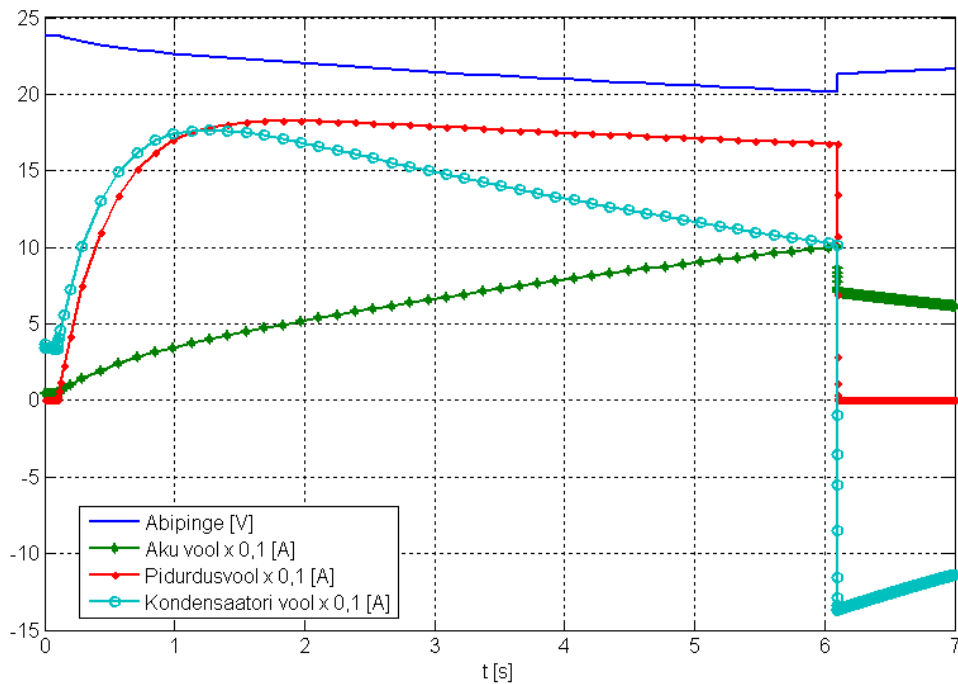
Joonis 5.7. Rööpühendusega koostoimelise salvesti mudel



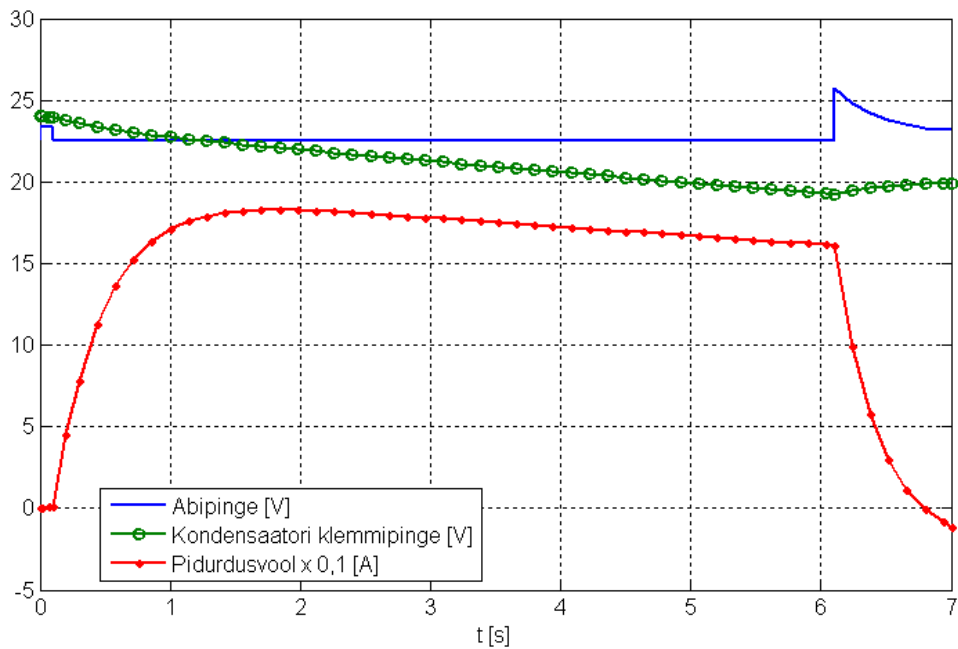
Joonis 5.8. Jada-rööp ümberlülitusega koostoiemlise salvesti mudel

Lisatud rööpne ülikondensaatorpatarei suurendab väikepingesüsteemi stabiilsust märgatavalt (joon 5.9). Algfaasis tõuseb pidurdusvool 180 A-ni ja hakkab siis aeglaselt vähenema, põhjuseks ajas kasvav pingelang akupatarei sisetakistusel. Energiavahetuses osalevad mõlemad salvestid, seejuures ülikondensaatori vool tühjenemise käigus väheneb ja aku oma kasvab. Vähenev klemmpinge ongi ülikondensaatori energiavahetuse eelduseks (5.6). Avariipidurduse kestusega 6 s lõppedes on klemmpinge langenud 20,5 V-ni, rööpapiduri vabastamise järel hakkab ülikondensaator uuesti laaduma kas APS-ist või põhivaruallikast, st voolu suund muutub. Aku- ja ülikondensaatorpatarei rööpühendus on seda tõhusam, mida erinevamad on kumbagi salvesti sisetakistused.

Jada-rööpühenduse kasutamisel jäävad rööpapidur ja ülikondensaatorpatarei avariipidurdusel ülejäänud väikepingeahelatest eraldatuks. Väikepingesüsteemi pinge väheneb ainult vaevumärgatavalt ülejäänud, püsiva iseloomuga koormuste toimel (joon 5.10). Ülikondensaatorpatarei hakkab tiputarbijat toites tühjenema, seejuures tema klemmpinge langeb. Pidurdusvool väheneb koos toitepingega, samas küllastuspiirkonna lähedal pole indutseeritud tõmbejõud voolust enam ruutsõltuvuses (5.1). Pärast rööpapidurite vabastamist tekitab nende mähiste induktiivsustes salvestunud energia väikepingesüsteemis hetkelise liigpinge, mis on välditav nt diodi lisamisega alamahele rööpapidur-ülikondensaatorpatarei sisendisse.



Joonis 5.9. Rööpühenduses koostoimelise salvesti simuleeritud voolude ja pinged avariipidurdusel



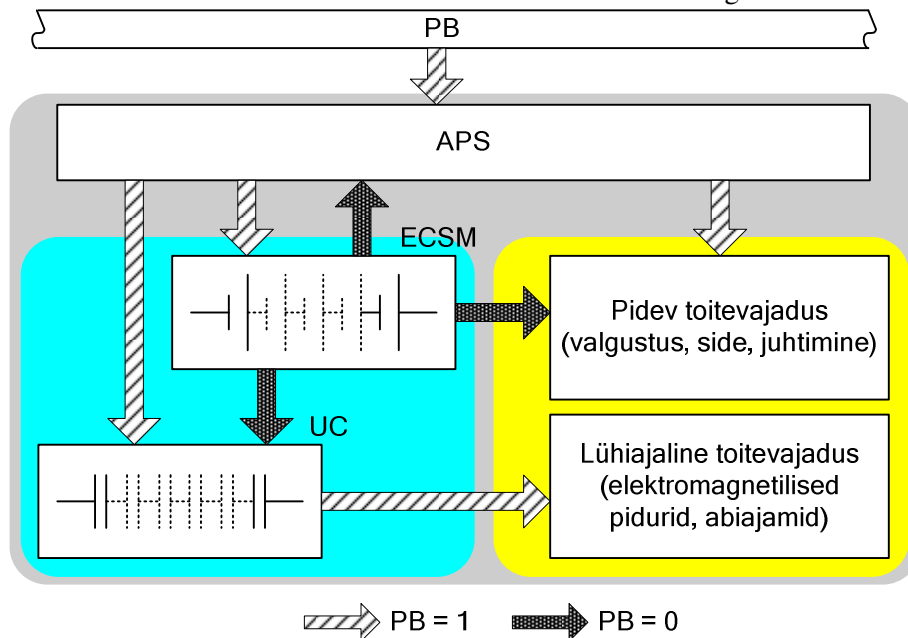
Joonis 5.10. Jada-rööp ümberlülitusega rööpapidurite voolu ja pingete kõverad

Simulatsioonide tulemused näitavad, et valitud ülikondensaatormoodulid täidavad nende pandud ülesande, suurendades rööpapidurite voolu ja piirates abipinge langust. Ülikondensaatorite kasutamine väikepingelistes abiahelates pakub mitmeid eeliseid:

- 1) avariipidurite tõhususe ja töökindluse paranemine, seda eriti madalatel temperatuuridel, kui aku efektiivsus on piiratud;
- 2) väikepingesüsteemi töökindluse paranemine, kuna kondensaatorpatari on võimeline teatud ulatuses summutama kõrgsageduslikke häireid;
- 3) võimalus vähendada akupatari mõõtmeid, kuna selle ülesandeks jääb vaid avariiolukorras pideva toitevajaduse katmine;
- 4) tipukoormuste silumisega väheneb ka APS maksimaalne väljundvõimsus, mistõttu selle mass, gabariidid ja maksumus vähenevad;
- 5) akupatari tööea pikenemine tänu väiksema intensiivsusega koormustsüklitele.

Edasiseks pingelangude vähendamiseks ja töökindluse suurendamiseks tuleks ülikondensaatorid paigutada võimalikult tiputarbijate lähedusse.

Trammi KT4 väikepingepaigaldise moderniseerimisettepaneku kokkuvõtlik skeem on toodud joon 5.11, kus on näidatud energiavood APS toitepinge olemasolul ($PB = 1$) ja selle katkemisel ($PB = 0$). Tegemist on ühes varasemas uurimuses [VIN05] välja pakutud skeemilahenduse täiustusega, kus tipukoormuste energiavajadus kaetakse ülikondensaatorpatari UC abil ka APS primaarpinge olemasolul. Primaarpinge kadumisel toidab elektrokeemiline salvesti ECSM (aku) ainult pideva iseloomuga tarbijaid ja APS juhtimisahelaid, impulsskoormused kaetakse kas osaliselt või täielikult ülikondensaatorsalve energia arvelt.



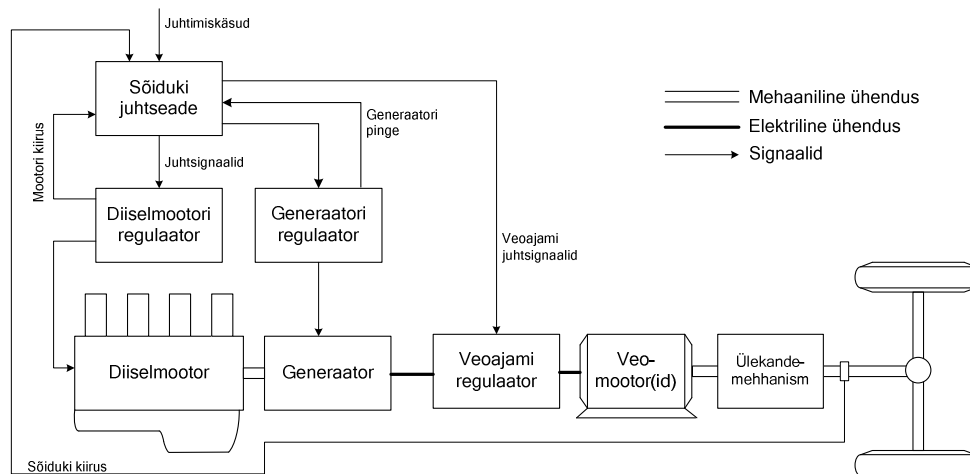
Joonis 5.11. Trammi moderniseeritud väikepingepaigaldis

6 Energiatõhusa elekterveo kontseptsiooni edasiarendusvõimalused

6.1 Energiasääst diiselelektrilistes ajamites

Diiselelektrilise ülekandega manöövervedurid (joon 6.1) on teatud mõõndustega käsitletavad elektersõidukitena, mille toiteallikas ehk elektrijaam asub sõiduki pardal. Nende ülesandeks on rongikoosseisude komplekteerimine sorteerimisjaamades. Reeglina veavad vedurid üksikut vagunit või vagunite gruppi, iseloomulik on tsükliline töörežiim. Viimane tähendab seda, et vedur arendab täisvõimsust vaid lühiajaliselt vaguneid paigalt tõmmates, ülejäänud aja töötab jõuagregaat kas väiksemal koormusel või tühijooksul. Töörežiim on sarnane linnas liikuvale sõidukile [AKL07] [DES04].

Diiselmootori (või mõni muu vedelmootori) keemiline energia muundatakse soojusmootorist ja generaatorist koosneva diisel-generaatoragregaadi vahendusel elektrienergiaks, mida kasutatakse veeremise käitamiseks. Manööverveduri pardapealses energiasüsteemis tulevad energiahalduse probleemid esile teravamalt kui üldistes elektrivõrkudes, seisnedes töörežiimist sõltuva kõikuva tarbimise (joon 6.2) rahuldamisest inertse tootmise tingimustes. Olemasolevate vedurite põhipuuduseks ongi ebaefektiivne energiatootmine, kuna dünaamiliste režiimide katmiseks valitud võimsad soojusmootorid on püsirežiimides väiksema kasuteguriga, kui nad peavad töötama nimikoormusest väiksemal võimsusel.

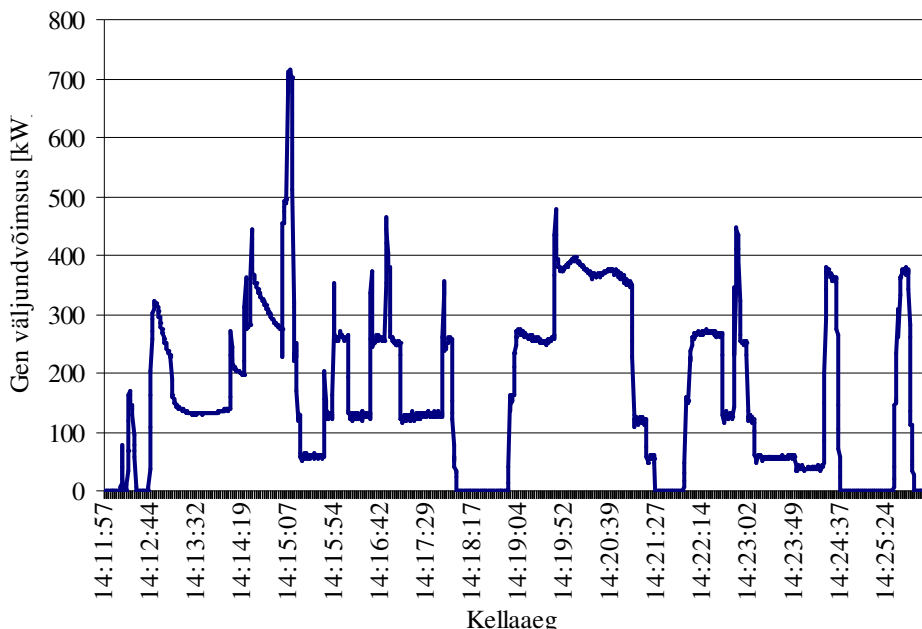


Joonis 6.1. Diiselelektrilise ajami üldistatud põhimõtteskeem

Seeria ČME3 (end Tšehhoslovakkia), TEM2 ja TEM18 (Venemaa) manöövervedurites kasutatakse alalisvooluülekannet, kus üks diiselmootor käitab sõltumatu ergutusega alalisvoolugeneraatorit, mis omakorda toidab veomootoreid.

Uue põlvkonna vedurites leiavad kasutust harjadeta sünkroongeneraatorid ja asünkroon-veomootorid. Sünkroongeneraatori vahelduv-väljundpinge alaldatakse ja vaheldatakse taas veomootorite toiteks sobivate parameetritega mitmefaasiliseks

pingesüsteemiks, sisuliselt on tegemist veogeneraatori väljundisse ühendatud sagedusmuunduriga. Uue ajamitüübiga vedurite soetamine Eesti raudteede pole lähiajal päevakorras olemasoleva veeremi küllaldase jääkressursi tõttu.

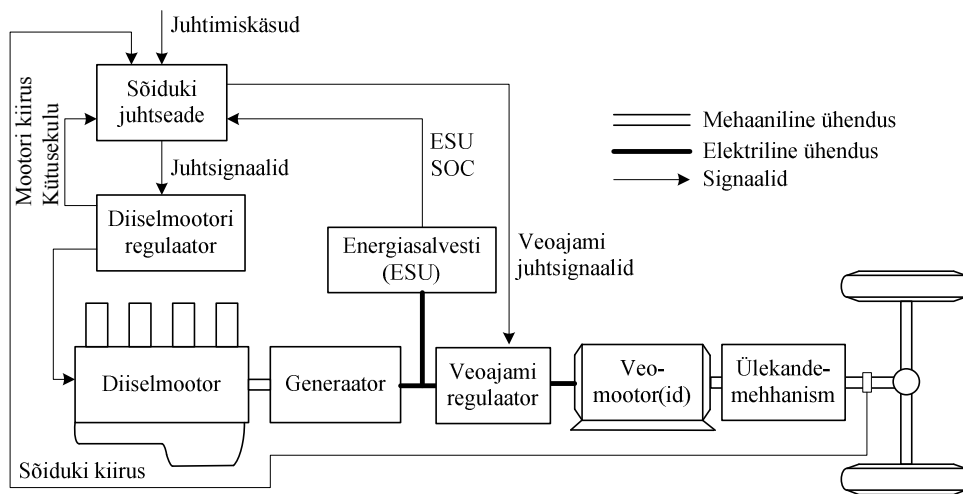


Joonis 6.2. Veogeneraatori koormusvõimsuse ajadiagramm

Hakates moderniseerima manööverveduri jõuallikat, diisel-generaator-agregaati (DGA), tuleb esmalt defineerida nõudmised [KOE05]:

1. Diiselmootor peab töötama optimaalses töörežiimis, mis reeglina ulatub 50 %...100 % P_n .
2. DGA võimsus peab vastama manöövritöö keskmisele võimsusele.
3. Dünaamiliste protsesside ajal peab DGA-d abistama lisaenergiaallikas, mis lülitatakse tööle lühiajaliselt.
4. Veduri juhi kasutajaliides peab jääma võimalikult endisele kujule, et vältida kulukat ümberõpet ja keerukaid sertifitseerimisprotsesse.

Kütusesäästu silmas pidades sobib manöövervedurile primaarallikas, mille võimsus vastab ajahüku keskmisele võimsusele. Siirderežiimide käigus sekkub protsessi lisaenergiaallikas, milleks kasutatakse energiasalvestit. Viimane salvestab diiselagregaadi ületoodetud energiat ja suurenenud võimsustarbe korral suunab selle veoajamise, vähendades primaarallikale langevat koormust [AKL07] [DES04] [THE03]. Taolisi kahe energiaallikaga sõidukeid nimetatakse hübriidsõidukiteks. Energiasalvesti lisamine lubab käsitleda manöövervedurit nn jadahübriidsõidukina (joon 6.3), kus diiselmootor, salvesti ja veomootorid on ühendatud vaid elektriliselt ja veogeneraatori võimsus vastab diiselmootori võimsusele. Rekuperatsioonivõimelise veoajami korral paranevad veduri kütusekulu näitajad veelgi [KOE05].



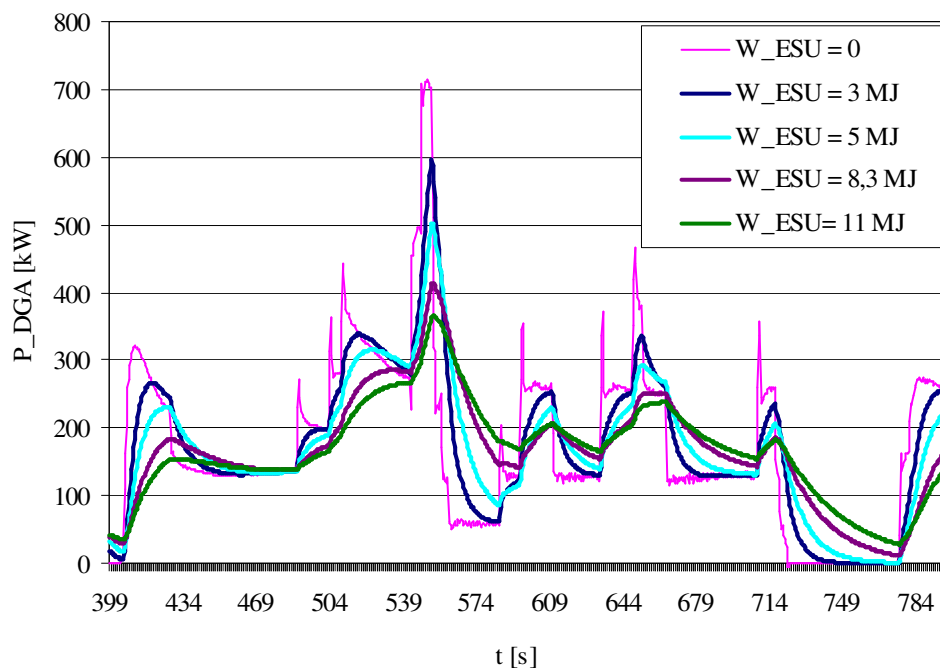
Joonis 6.3. Jada hübriidajami tüüpiline struktuurskeem [EHS05]

Hübriidse veoajami võimalikud talitlusrežiimid on määratud sõiduki oleku ja sõidukijuhi korraldustega [EHS05] [JAL97]:

1. Lisavõimsuse vajadusel siirdub sõiduk hübriid-veorežiimi. Selline olukord võib tekkida paigaltvõtul, järsul kiirendusel või liikumisel ülesmäge. Veojamit varustavad energiaga nii diiselaagregaat kui energiasalvesti. Analüütiliselt iseloomustab seda režiimi võrratus $P_{ESU} = P_{DGA} - P_{dem} < 0$, kus P_{dem} on juhi poolt ette antud võimsus, P_{DGA} diisel-generaator-agregaadi arendatav võimsus ja P_{ESU} energiasalvesti väljundvõimsus.
2. ESU-põhine talitus, kui energiavahetuses veoajamiga osaleb ainult energiasalvesti $P_{ESU} = -P_{dem} < 0$.
3. Diiselaagregaadi-põhine talitus, kui veoajami energiavarustuse tagab ainult primaarallikas $P_{dem} = P_{DGA}; P_{ESU} = 0$.
4. ESU laadimine diiselaagregaadist, kui salvesti energiajääk langeb alla määratud nivoo. Sellisel juhul diiselaagregaat üheaegselt toidab veoajamit ja laeb energiasalvestit $P_{ESU} = P_{DGA} - P_{dem} > 0$. Selline režiim on võimalik ainult siis, kui veoajami võimsus jääb allapoole diiselaagregaadi maksimumvõimsust.
5. Regeneratiivse pidurduse režiim, kui sõiduki aeglustumisel vabanenud energia kasutatakse ESU laadimiseks [CER05].

Energiasalvestitena kasutatakse sellises veeremis kas hoorattasüsteeme [THE03], ülikondensaatoreid [PIS05] [DES04] [ZHA08] või kombineeritud aku-ülikondensaatorpatareisid [AYA03] [BEN05].

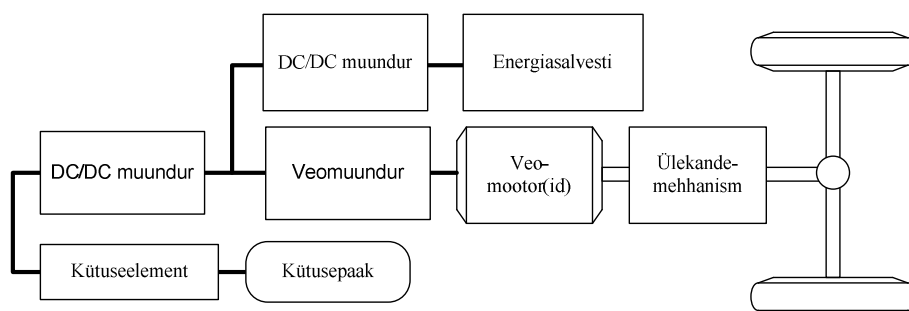
Hübriidse veduri energiasalvesti parameetrite leidmiseks on võimalik kasutada arvutusvalemeid (4.9)...(4.14) ning vastavat voodiagrammi (joon 4.8). Näitena on joon 6.4 toodud salvesti eeldatav mõju põlevkiviraudteel mõõdetud veduri TEM18 DGA koormusgraafikule. Ilmneb, et vaadeldavate tingimuste korral on võimalik energiasalvesti lisamisega vähendada DGA võimsust ligikaudu kahekordselt.



Joonis 6.4. Salvesti mahutavuse mõju DGA-st tarbitavale võimsusele

6.2 Energiasalvesti koostoime kütuseelementidega

Kütuseelemendid muundavad kütuse keemilise (nt vesiniku, metanooli) energia otse elektrienergiaks vaheastmeid läbimata, seetõttu on nende kasutegur võrreldes tavaliste soojuselektrijaamadega suurem. Tootes elektrienergiat otseselt vesinikust, on heitgaasiks ainult veeaur, mis muudab kütuseelemendid atraktiivseks keskkonnasäästlikkuse mõttes. Kütuseelementide põhipuuduseks lisaks suhteliselt kõrgele maksumusele on nende väike erivõimsus, mis eeldab dünaamiliselt muutuva koormuse katmiseks täiendavaid energiaallikaid salvestite näol (joon 6.5.). Kirjandusest leiab viiteid nii maantee- [MIE06] kui ka rööbassõidukitele [MIL06] [MOG03].



Joonis 6.5. Kütuseelemendi ja energiasalvestiga elektrisõiduk [MIE06]

Järeldused ja soovitused

Väitekirja alguses käsitletud tehnika taseme analüüs näitas kätte kitsaskohad ja võimalikud lahendused kontaktliiniga seotud elektertranspordi energiavarustuses:

1. Tallinna trammi- ja trolliliiklust teenindavate veolajaamade vananenud skeemilahendus. Kuigi kaod veolajaamades on tühised, võrreldes ülejäänud energijaotuse infrastruktuuriga, on soovitatav moderniseerimiste ja rekonstrueerimiste käigus eelistada sildtopoloogial põhinevaid alaldeid, mis on rohkem levinud ja seega konkurentsivõimelisema maksumusega.
2. Senisest rohkem tuleb rakendada veolajaamade paralleeltööd, mis lubab koormust jaotades vähendada energiaülekandega kaasnevaid kadusid.
3. Veolajaamade komplekteerimisel vastuparalleelse, pidurdusenergiat tagastamist keskpingevõrku võimaldava vaheldiga võib hoida kokku kuni 40 % elektrienergiat, samas puudub koormuse silumise efekt.
4. Samas suurusjärgus, kuni 40 % ulatuva energiasääst saavutatakse ka veolajaama komplekteerimisel energiasalvestiga. Võimsuse silumise efekti tõttu võib veotrafo ja alaldi valida väiksema võimsusega kui salvesti puudumisel, mis rajatavate veolajaamade korral võib kompenseerida salvesti maksumuse.
5. Liini punktidesse, kus suure tõenäosusega esinevad alapinged, tuleb kaaluda salvestusalajaamade ühendamist, mis võimaldavad ka pidurdusenergia taaskasutamist.
6. Sõidukitele paigaldatud energiasalvesti on energiatõhususe mõttes parim lahendus, kuna liinikoormuse silumine, alapinge kompenseerimine ja pidurdusenergia ringlus toimuvad tarbija vahetus läheduses, vähendades seega tsentraliseeritud salvestusega kaasnevaid ülekandekadusid. Pardapealse salvesti lisaeeelis on ka teatud ulatuses autonoomia kontaktvõrgust ning kontaktliini kulumise vältimine halva kontaktiga kaasnevate kaarlahenduste tõttu.
7. Kaaluda tuleb ka organisatoorsete energiasäästumeetmete rakendamist kas liikluskorraldussüsteemide kaasajastamise ja/või ökonoomse sõidustiili võtete kasutamisega.

Teises ja kolmandas peatükis käsitletud energiasalvestite uurivast analüüsist järeldub:

1. Linnasisesel elektertranspordil, kus eesmärgiks on koormustippude vähendamine ja pidurdusenergia taaskasutamine, tulevad kõne alla ainult kiiretoimelised energiasalvestid, mis taluvad impulsskoormust ja on suure laadimis-tühjenemistsükli arvuga.
2. Pardapealsetes energiasalvestites sobib praeguse tehnika taseme juures kasutada eeskätt ülikondensaator- ja hooratassalvesid, kusjuures esimeste puhul on liidesed ja juhtimismeetodid lihtsamad. Perspektiivne tehnoloogia on liitium-ioonakud, mis tänu suurele erivõimsusele lubab läbida kontaktliinivabalt pikemaid vahemaid.
3. Veo- ja salvestusalajaamades ehk tsentraliseeritud salvestuse korral tuleks eelistada hooratassalvesteid, kuna küllaldase paigaldusruumi puhul tuleb nende kumulatiivne maksumus soodsam kui ülikondensaatorpatareil.

Neljandas peatükis vaadeldi energiasalvesti parameetrite arvutusmetoodikat sõltuvalt lahendatavast energiatõhususe parendamise ülesandest. Arvutusmetoodikat rakendati Tallinna elektertranspordi varasematel uuringutel registreeritud andmeridadele, arvutuste tulemusel ilmnis energiasalvesti mõju kontaktliinist tarbitavale võimsusele ja toitepingele. Põhijäreldused on järgmised:

1. Tarbitava võimsuse silumiseks salvesti vajalikud parameetrid sõltuvad suurel määral sõiduki massist. Trollidele sobivad salvestid on arvutuslikult väiksema mahutavuse ja võimsusega kui rööbassõidukite korral.
2. Vanade, 3. põlvkonna trollide pingegraafikuid uurides ilmnisid suured siirde-liigpinged. Tegemist on analüüsi kõrvaltulemusega, millele pole varem tähelepanu juhitud. Siit tuleneb ülesanne tehnilise järelevalvega tegelevatele asutustele kontrollida, kas trollid 14Tr ja 15Tr täidavad elektromagnetilise ühilduvuse norme.
3. Suurima efektiivsuse annab pardapealne energiasalvesti rekuperatsioonivõimeliste veoajamite korral, kuna pidurdusenergia on taaskasutatav mootoritalitluses.
4. Salvestatav pidurdusenergia kasvab koos sõiduki massiga ja kiiruse ruuduga, mistõttu pidurdusenergia taaskasutamine on efektiivne just rööbassõidukites. Samas peab salvesti võimsus olema sõiduki kineetilise energia neelamiseks lühikeses ajavahemikus väga suur, mistõttu pidurdusenergia vastuvõtt ei saa toimuda maksimaalse aeglustuse juures.
5. Tallinna kesklinnas on lõike, kus tänu trassi siledale profiilile ja rekuperatiivpidurduse kasutamisele on energiakulu teepikkuse ühikule väiksem kui terve trassi keskmine. Sellistes lõikudes tuleks kõne alla osaline loobumine kontaktliinist, mis seab piiranguid sõidukite kõrgusele ja reostab visuaalselt linnaruumi.
6. Kiireima tasuvusaja annab veoalajaama paigutatud energiasalvesti.

Viiendas peatükis uuriti ülikondensaatorpatareide kasutusvõimalusi trammi väikepingeliste abiahelate energiatõhususe parendamisel. Katsetuste ja teoreetiliste arvutuste käigus tehti kindlaks:

1. Trammide KT4 olemasolevad nikkel-kaadmium akupatareid on enamasti oma eksploatatsiooniaja ületanud ja ei täida seepärast täiel määral neile pandud ülesandeid impulsskoormuste avariitoitel.
2. Akupatareiga ühendatud ülikondensaatorpatarei suurendab koostoimelise energiasalve võimsust ja tagab paremini kriitiliste tarbijate nagu elektromagnetiline rööpapidur talitluse avariiolukordades.

Viimane peatükk kirjeldas kontaktliiniga seotud elektertranspordile loodud energiasalvestite arvutusmetoodika laiendamist hübriidsõidukitele, konkreetses näites diiselektrilistele ajamisüsteemidele:

1. Õigesti dimensioneeritud salvesti vähendab diiselektrilise ajami kütusekulu.
2. Metoodika on kasutatav ka kütuseelementidega sõidukite puhul.

Viidatud kirjanduse loetelu

- [ABB07] **Abbey C., Joos G.** 2007. Supercapacitor Energy Storage for Wind Energy Applications – IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 3, May/june 2007; pp. 769-776.
- [ADI98] **Adinolfi A., Lamedica R., Modesto C. et al.** 1998. Experimental Assessment of Energy Saving Due to Trains Regenerative Braking in an Electrified Subway Line – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, 1998, pp. 1536-1542.
- [AFF05] **Affanni A., Bellini A., Guglielmi P., Tassoni C.** 2005. Battery Choice and Management for New-Generation Electric Vehicles – IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 5, October 2005, pp. 1343-1349.
- [AKL07] **Akli C. R., Roboam X., Sareni B., Jeunesse A.** 2007. Energy management and sizing of a hybrid locomotive – Proc. of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Sept 2-5, 2007, 10 p.
- [ALS08] **Alstom Transport.** 2008. <http://www.transport.alstom.com/>
- [AYA03] **Ayad M. Y., Raël S., Davat B.** 2003. Hybrid power source using supercapacitors and batteries – Proc. of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-4, 2003, 10 p.
- [BAR08] **Barrero R., Tackoen X., van Mierlo J.** 2008. Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles – Proc. of the 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 1-3 Sept. 2008, pp. 1512-1517
- [BEN05] **Bentley P., Stone D.A.** 2005. The parallel combination of a valve regulated lead acid cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer – Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, 10 p.
- [BIN03] **BINE Informationsdienst.** 2003. Projekt DYNASTORE. Kinetische Speicherung von Elektrizität – Projektinfo 11/03, <http://www.bine.info/>, 4 p.
- [BOC07] **Bocharnikov Y., Tobias A., Roberts C. et al.** 2007. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways – IET Electric Power Applications, Vol. 1, Issue 5, pp. 675–682.
- [BOD06] **Bodach M.** 2006. Energiespeicher im Niederspannungsnetz zur Integration dezentraler, fluktuierender Energiequellen. Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Chemnitz, 121 p.
- [BOI01] **Boiko V., Lehtla M., Vinnikov D., Joller J.** 2001. Lepinguline uurimistöö nr. 130L. Elektriraudtee kontaktvõrgu ja veoalajaamade tehnilise seisundi uuring. Lõpparuanne, TTÜ elektriajamite ja jõuelektronika instituut, 2001, 42 lk.
- [BOI02] **Boiko V., Vinnikov D., Joller J.** 2002. Starting of a Diesel Engine by Help of Ultracapacitors – Proc. of the 8th Baltic Electronics Conference, Oct 6-9, 2002, pp 405 - 406.
- [BOM08] **Bombardier Transportation.** 2008. <http://www.bombardier.com/de/transportation>

- [BOX09] **Box E., Luceño A., del Panigua-Quiñones C.** 2009. Statistical Control by Monitoring and Adjustment. Wiley, 2009, 360 p.
- [BUR98] **von Burg P.** 1998. Moderne Schwungmassenspeicher- eine alte Technik in neuem Aufschwung – VDI-GET Fachtagung Energiespeicherung für elektrische Netze, No. 10/11, November 98, 12 p.
- [CER05] **Cerovsky Z., Mindl P.** 2005. Regenerative braking by electric hybrid vehicles using super capacitor and power splitting generator – Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, 10 p.
- [CHA00] **Chang J., Chen Z., Cai L., Zhao Y.** 2000. Flywheel Energy Storage Design for Distribution Network – Proc. of the IEEE PES 2000 Winter Meeting, 23-27 January 2000, pp. 2619-2632.
- [CHA07] **Chapelsky C., Salmon J., Knight A.** 2007. Control of a High-Inertia Flywheel as Part of a High Capacity Energy Storage System – Proc. of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2-26 Apr. 2007, pp. 1437-1440
- [CHA97] **Chang C. S., Sim S.S.** 1997. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms', IEE Proceedings on Electric Power Applications., Vol. 144, Issue 1, 1997, pp. 65–73.
- [CHE00] **Cheng J. X., Cheng J. S., Song J., Zhao P.** 2000. Algorithms on Optimal Driving Strategies for Train Control Problem – Proc. of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, June 28-July 2, 2000, pp. 3523-3527.
- [CHE06] **Cheng J., Mierlo J. et al.** 2006. Super Capacitor based Energy Storage as Peak Power Unit in the Applications of Hybrid Electric Vehicles – Proc. of the 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Mar 2006, pp. 404-408.
- [CHR00] **Christen T., Carlen M.W.** 2000. Theory of Ragone plots – Journal of Power Sources, No. 91, Issue 2, 2000, pp. 210-216.
- [CHY06] **Chymera M., Renfrew A., Barnes M.** 2006. Energy Storage Devices in Railway Systems – Seminar on Innovation in the Railways, Sept. 2006, 5 p. .
- [CIM05] **Cimuca G., Radulescu M. et al.** 2005. Energy-optimized direct torque control of an induction machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator – Proc. of the 6th International Symposium on Advanced Electro Mechanical Motion System, Sept 27-29, 2005, pp. 80-86.
- [CIV03] **The CIVITAS Initiative.** 2003. Cleaner and better transport in cities. The SMILE project – <http://www.civitas-initiative.org/>
- [DES04] **Destraz B., Barrade P., Rufer A.** 2004. Power Assistance for Diesel-Electric Locomotives with Supercapacitive Energy Storage – Proc. of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, pp 677-682.

- [DES07] **Destraz B., Barrade P., Rufer A., Klohr M.** 2007. Study and Simulation of the Energy Balance of an Urban Transportation Network – Proc. of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Sept 2-5, 2007, 10 p.
- [DOE05] **Doerffel D., Sharkh S. A.** 2006. A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries – Journal of Power Sources, No. 155, 2006, pp. 395-400.
- [EHS05] **Ehsani M., Gao Y., Gay S.E., Emadi A.** 2005. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. Boca Raton CRC Press, 2005, 395 p.
- [ELE09] **Elektriraudtee AS.** 2009. Elektriraudtee rongihankel kvalifitseerusid kolm taotlejat. Pressiteade 31.08.2009, <http://www.elektriraudtee.ee/>
- [ENE08] **Eesti Energiatehnoloogia Programm.** 2008. <http://www.mkm.ee/?id=345205>, 36 lk.
- [EPC06] **EPCOS.** 2006. UltraCap® – <http://www.epcos.com/>
- [ESA07] **Electricity Storage Association.** 2007. Technology comparisons – <http://www.electricitystorage.org/>
- [EUR05] **Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu** 2005. Direktiiv 2005/32/EÜ, 6. juuli 2005., 30 lk.
- [EVS03] **European Standard EN 13452-1:2003.** Railway applications - Braking - Mass transit brake system - Part 1: Performance requirements. 31 p.
- [EVS05] **European Standard EN 50163:2005.** Railway applications - Supply voltages of traction systems, 31 p.
- [EVS07] **European Standard EN 50155:2007.** Railway applications - Electronic equipment used on rolling stock. 32 p.
- [FLA05] **Flaherty P. A.** 2005. Multi-Stage Hybrid Drives For Traction Applications – Proc. of the ASME/IEEE 2005 Joint Rail Conference, March 15-18, 2005, pp. 171-175.
- [FLO95] **Flowers J. B.** 1995. Load Sharing With Thyristor Controlled Rectifier Substations – Proc. of the IEEE/ASME 1995 Joint Railroad Conference, 4-6 April 1995, pp. 69-73
- [FUX07] **Fu X. X., Xie X.** 2007. The Control Strategy of Flywheel Battery for Electric Vehicles – Proc. of the 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, May 30 - June 1, 2007, pp. 492-496.
- [GEN85] **Genta G.** 1985. Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems. Burlington, Butterworth-Heinemann, 1985, 374 p.
- [GIZ08] **Gizinski Z., Gasiewski M., Mascibrodzki I. et al.** 2008. Hybrid-type system of power supply for a trolleybus with an asynchronous motor – Proc. of the 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 1-3 Sept. 2008, pp. 1585-1590.
- [GOL01] **Golovitcher I. M.** 2001. Energy Efficient Control of Rail Vehicles – Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Oct 7-10, 2001, Vol. 1, pp 658-663.

- [GON06] **Gonzalez-Longatt F. M.** 2006. Circuit Based Battery Models: A Review – Proc. of the 2do Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Apr. 3-7, 2006, 5 p.
- [GOR08] **Gorobecs M.** 2008. Research of Genetic Algorithms for Optimal Control of Electric Transport, Riga Technical University, 2008, 98 p.
- [GUO07] **Guo Z., Mu X. et al.** 2007. Research on the Control of Flywheel Battery – Journal of Applied Sciences, Vol. 7, No. 21, 2007, pp. 3312-3316.
- [GUN05] **Gunselmann W.** 2005. Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems – Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, 10 p.
- [HAL02] **Halfmann U., Hein G., Olsen H., Röhlig S.** 2002. Wirtschaftliche Optimierung von Stadtbahnen durch Nutzung der Bremsenergie in Energiespeichern – VDE-Bericht zum VDE Kongress 2002 NetWorlds, Vol. 1, 2002, pp. 419-425.
- [HOC07] **Hamburger Hochbahn AG.** 2007. Stationärer Schwungmasse Energiespeicher bei der Hamburger HOCHBAHN AG, 2007, 16 p.
- [HOU08] **Hou J., Guo X.** 2008. Modeling and Simulation of Hybrid Electric Vehicles Using HEVSIM and ADVISOR – Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept. 3-5, 2008, p. 1-5.
- [IAN08] **Iannuzzi D.** 2008. Improvement of the Energy Recovery of Traction Electrical Drives using Supercapacitors – Proc. of the 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 1-3 Sept. 2008, pp. 1469-1474.
- [JAL97] **Jalil N., Kheir N. A., Salman M.** 1997. A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle – Proc. of the American Control Conference, June 1997, pp. 689-693.
- [JOH02] **Johnson V. H.** 2002. Battery performance models in ADVISOR – Journal of Power Sources, No. 110, Issue 2, 2002, pp. 321-329.
- [JOL02] **Joller J., Lehtla M.** 2002. Power analyse of a tram system with energy storage devices. – Proc. of the 8th Biennial Baltic Electronics Conference. October 6-9, 2002, 2 p.
- [JOL04] **Joller J., Laugis J., Pettai E.** 2004. Elektrisõiduki veoajam – Patenditaotlus EE200200422A, 15.04.2004, 13 lk.
- [JOL98] **Joller J., Mälter M., Arukivi A.** 1998. Lepinguline uurimistö nr. 744L. Tallinna Trammi- ja Trollibussikoondise veeremi elektrijamite tehnilis-majanduslike näitajate teoreetiline ja eksperimentaalne uuring. Lõpparuanne. II köide, TTÜ elektrijamite ja jõuelektronika instituut, 1998, 365 lk.
- [JON05] **Jong J. C., Chang E. F.** 2005 Models for Estimating Energy Consumption of Electric Trains –Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, 2005, pp. 278 - 291.
- [JUN04] **Junling C., Xinjian J. et al.** 2004. A novel uninterruptible power supply using flywheel energy storage unit – Proc. of the 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 14-16 Aug, 2004, Vol. 3, pp. 1180-1184
- [KIE01] **Kiessling F.** 2001. Contact lines for electric railways : planning, design, implementation. Munich, Publicis, 2001, 822 p

- [KIM08] **Kim B. G., Tredau F. P., Zalameh Z. M.** 2008. Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles – Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept 3-5, 2008, 5 p.
- [KOE05] **Koerner O., Brand J., Rechenberg K.** 2005. Energy Efficient Drive System for a Diesel Electric Shunting Locomotive – Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, 10 p.
- [KUO98] **Kuo H. Y., Chen T. H.** 1998. Simulation of Daily Load Curves at Traction Substations along an Electric Railway – Proc. of 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery, Vol. 2, March 3-5 1998, pp. 708 - 713.
- [LAF05] **Lafoz M., D. Ugena D. et al.** 2005. 200 kVA prototype of Kinetic Energy Storage System based on Switched Reluctance Machine Technology – Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, 8 p.
- [LEH08] **Lehtla M., Lehtla T., Roasto I.** 2008. Projekt F7114. Kahesuunalist juhitavat energiavahetust võimaldavad muundurid elektrienergia salvestamiseks. Eeluuringu aruanne. TTÜ elektrienergia ja jõuelektronika instituut, 2008, 63 lk.
- [LHO05] **Lhomme W., Delarue P., Barrade P. et al.** 2005. Design and Control of a Supercapacitor Storage System for Traction Applications – Proc. of the 14th IAS Industry Applications Conference, Vol. 3, 2-6 Oct. 2005, pp. 2013-2020.
- [LIN04] **Linder U.** 2004. Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung. Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme der TU Berlin, 253 p.
- [LIR05] **Li R., Pottharst H., Fröhleke N. et al.** 2005. Design and Implementation of a Hybrid Energy Supply System for Railway Vehicles – Proc. of the 20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 1, 6-10 March 2005, pp. 474-480.
- [LIU09] **Liu H., Mao C. et al.** 2009. Electronic power transformer with supercapacitors storage energy system – Electric Power Systems Research, No. 79, 2009, pp. 1200-1208.
- [LOH04] **Lohner A., Evers V.** 2004. Intelligent power management of a supercapacitor based hybrid power train for light-rail vehicles and city busses – Proc. of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, 20-25 June 2004, pp 672-676.
- [LUC08] **Lukic S. M., Cao J. et al.** 2008. Energy Storage Systems for Automotive Applications – IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, June 2008, pp 2258-2267.
- [MÄG07] **Mägi M.** 2007. Analysis of modelling electric transportation networks – Proc. of the doctoral school of energy- and geotechnology, Jan 15–20, 2007, pp. 73-77.

- [MEI07] **Meinert M., Rechenberg K., Hein G.** 2007. Energy efficient solutions for the complete railway system – Proc. of the International ETG Congress, Oct 23-24, 2007, 7 p.
- [MIE03] **van Mierlo J, van der Bossche P., Maggeto G.** 2003. Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators – Journal of Power Sources, No. 128, 2004, pp. 76-89.
- [MIE06] **van Mierlo J, Cheng Y., Timmermans J. M., van der Bossche P.** 2006. Comparison of Fuel Cell Hybrid Propulsion Topologies with Super-Capacitor – Proc. of the 12th Power Electronics and Motion Control Conference, Aug 30 - Sept. 1, 2006, pp. 501-505.
- [MIL96] **Miller J.** 1996. White Paper. Power Interface Considerations For Proposed IEEE Recommended Practices For Integrated Power Packages – http://grouper.ieee.org/groups/1461/Power_Interface_Considerations_For_1461.html
- [MIL06] **Miller A., Peters J.** 2006. Fuelcell Hybrid Locomotives: Applications and Benefits – Proc. of the 2006 JRC2006 Joint Rail Conference, April 4-6, 2006, pp. 287-293.
- [MOG03] **Moghbelli H, Gao Y., Langari R., Ehsani M.** 2003. Investigation of Hybrid Fuel Cell (HFC) Technology Applications on the Future Passenger Railroad Transportation – Proc. of the 2003 ASME/IEEE Joint Rail Conference, April 22-24, 2003, pp. 39-53.
- [MÖL05] **Möller T., Lehtla M., Rosin A. et al.** 2005. . Projekt nr 565F. Elektriraudtee veeremi elektri- ja infosüsteemide renoveerimine. Aruanne, TTÜ elektriainjamite ja jõuelektronika instituut, 2005, 18 lk.
- [NAP99] **di Napoli A., Capponi F. G., Solero L.** 1999. Power Converter Arrangements with Ultracapacitors for Battery Load Leveling in EV Motor Drives – Proc. of the 8th European Conference on Power Electronics and Applications, Sept 7-9, 1999, 8p.
- [NIL96] **Nilsson J. W.** 1996. Electric Circuits. Addison-Wesley, 1996, 983 p.
- [NOW04] **Nowak M., Hildebrandt J., Luniewski P.** 2004. Converters with AC Transformer Intermediate Link Suitable as Interfaces for Supercapacitor Energy Storage – Proc. of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 5, 20-25 June 2004, pp 4067-4073.
- [OGA07] **Ogasa M., Taguchi Y.** 2007. Power electronics technologies for a lithium ion battery tram – Proc. of the Power Conversion Conference, 2-5 June 2007, pp. 1369-1375.
- [ONA08] **Onar O. C., Uzunoglu M., Alam M.S.** 2008. Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultracapacitor hybrid power system – Journal of Power Sources, Vol. 185, Issue 2, Dec 1 2008, pp 1273-1283
- [OPT07] **Optimal Energy Systems, Inc.** 2007. TrackSide Flywheel Power Module – Whitepaper, April 27, 2007, 12 p.
- [PAA05] **Paatero J. V., Lund P. D.** 2005. Effect on Energy Storage on Variations in Wind Power – Wind Energy, Volume 8, Issue 4, 10/2005, pp. 421-441.

- [PET05] **Pettai E., Möller T., Rosin A.** 2005. Projekt 573L. Tallinna ühissõidukite prioriteedisüsteemi ja sõitjate infosüsteemi tehniline lähteülesanne. TTÜ elektriainjamite ja jõuelektroonika instituut, 2005.
- [PIN98] **Pindyck R. S.** 1998. Econometric models and economic forecasts. Irwin/McGraw-Hill, 1998, 634 p.
- [PIS05] **Pisu P., Rizzoni G.** 2005. A Supervisory Control Strategy for Series Hybrid Electric Vehicles with Two Energy Storage Systems – Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept. 7-9, 2005, pp. 65-72.
- [POS96] **Post R. F.** 1996. A New Look at an Old Idea. The Electromechanical Battery – Science & Technology Review. Lawrence Livermore National Laboratory, April 1996, 8 p.
- [PUL06] **Pullen K. R., Ellis C. W.** 2006. Kinetic energy storage for vehicles – Proc. of the IET Hybrid Vehicle Conference, Dec 2-13, 2006 pp 91-108
- [RAN95] **Randewijk P.-J., Enslin J.** 1995. Inverting DC Traction Substation with ActivePower Filtering Incorporated – Proc. of the 26th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 18-22 June 1995, Vol. 1, pp. 360-366
- [RAS06] **Rashid M. H.** 2006. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. 2nd edition. Academic Press, 2006, 1192 p.
- [RAW08] **Rawicki S.** 2008. Energy Saving Control of Tram Motors Taking Light Signalling into Account – Proc. of the 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 1-3 Sept. 2008, pp. 1504-1513.
- [REI01] **Reiner G., Wehlau N.** 2001. Concept of a 50 MW/650 MJ power source based on industry-established MDS flywheel – Digest of Technical Papers: Pulsed Power Plasma Science, Vol. 1, 17-22 June 2001, pp.187-190.
- [REI06] **Reivik M.** 2006. Elektrisõiduki toitesüsteem – Kasuliku mudeli kirjeldus EE0614U1, 17.07.2006., 8 lk.
- [REN98] **Renault Co.** 1998. Electric power supply device with secondary battery and supercapacitor – EP0865142, European Patent Office, Sept 16, 1998, 15 p.
- [RIC02] **Richardson M. B.** 2002. Flywheel Energy Storage System for Traction Applications – Proc. of the International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, July 4-7, 2002, pp. 275-279.
- [ROA06] **Roasto I., Lehtla T., Möller T., Rosin A.** 2006. Control of Ultracapacitors Energy Exchange – Proc. of the 12th Power Electronics and Motion Control Conference, Aug 30 - -Sept. 1, 2006, pp. 1401-1406.
- [ROH94] **Rohatgi J., Nelson V.** 1994. Wind Characteristics - an Analysis for the Generation of Wind Power. Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 1994, 239 p.
- [ROS04] **Rosin A., Lehtla M., Möller T.** 2004. Intelligent Control and Diagnostics System for Tallinn Trams – Proc. of the 11th International Power Electronics and Motion Control Conference, Vol. 6, Sept 2-4m 2004, pp 185-188.
- [ROS06] **rosseta Technik GmbH.** 2006. Energiespeicher für das Straßenbahnnetz. <http://www.rosseta.de/texte/bahnsr.pdf>

- [RUF04] **Rufer A., Hotellier D., Barrade P.** 2004. A Supercapacitor-Based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, 2004, pp. 629-636.
- [RUF99] **Rufer A., Ravokatrasonlofo H.** 1999. Static converter for complementary energy storage with battery and supercapacitor – Proc. of the International Conference on Power Conversion and Intelligent Motion, June 21-24, 1999, 5 p.
- [SAF08] **Saft Space & Defense Division.** 2008. Li-ion energy storage systems for large space and defense applications – Doc N° 54069-2-1008, Edition October 2008, 6 p.
- [SAG04] **Sagareli S., Gelman V.** 2004. Implementation of New Technologies in Traction Power Systems – Proc. of the 2004 ASME/IEEE Joint Rail Conference, April 6-8, 2004, pp. 141-146.
- [SAM06] **Samineni S., Johnson B.K. et al.** 2006. Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for Voltage sag correction – IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, Issue 1, Jan.-Feb. 2006, pp 42-52.
- [SEK05] **Sekine Y.** 2005. Modern Traction System. Seminario material rodante. <http://www.railforum.net/PresentacionesPonencias/2005/18%20-%20Material%20Rodante%20-%20Marzo%202005/10.35%20-%2010.55%20Yasuhiro%20Sekine%20-%20Mitsubishi.pdf>
- [SHA08] **Shah V. A., Jivanadhar A. et al.** 2008. Review of Ultracapacitor Technology and its Applications – Proc. of the 15th National Power Systems Conference, Dec 2008, pp. 142-147.
- [SIE09] **Siemens Mobility.** 2009. <http://www.transportation.siemens.com/>
- [SIO08] **Siostrzonek T., Piróg S., Baszynski M.** 2008. Energy Storage Systems: The Flywheel Energy Storage – Proc. of the 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 1-3 Sept. 2008, pp. 1802-1806.
- [STA09] **Statistikaamet.** 2009. Statistika andmebaas. Majandus - transport. Transpordi üldandmed. <http://www.stat.ee/>. 2009.
- [SYR05] **Syrjakow M.** 2005. System und Modell – Vorlesung „Simulationstechnik“, http://ces.univ-karlsruhe.de/goethe/syrjakow/simtech_vorlesung/vl_material/system_und_modell.pdf, 13 p.
- [STE04] **Steiner M., Scholten J.** 2004. Energy Storage on board of DC fed railway vehicles – Proc. of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, 20-25 June 2004, pp 666-671.
- [STE07] **Steiner M., Klohr M.** 2007. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles – Proc. of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Sept 2-5, 2007, 10 p.
- [SUZ82] **Suzuki T.** 1982. DC power-supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes – IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 129, Issue 1, Jan 1982, pp. 18-26.

- [SYE07] **Syed F., Filev D., Ying H.** 2007. Fuzzy Rule-Based Driver Advisory System for Fuel Economy Improvement in a Hybrid Electric Vehicle – Proc. of the Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, 24-27 June 2007 pp 178-183
- [TAK02] **Takahara E., Waaksa T., Yamada J.** 2002. A Study for Electric Double Layer Capacitor (EDLC) Application to Railway Traction Energy Saving including Change Over between Series and Parallel Modes – Proc. of the Power Conversion Conference, Vol. 2, April 2-5, 2002, pp. 855-860.
- [TAK06] **Transpordi arengukava 2006-2010.** Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, 2006, 64 p.
- [TAL03] **Tallinna Linnavolikogu.** 2003. Tallinna ühtse piletisüsteemi ühistranspordi jätkusuutlik arengukava, teenindustaseme normid ning investeeringute ja rahastamise programm 2004-2010., 8 lk.
- [THE03] **Thelen R. F., Herbst J. D., Caprio M. T.** 2003. A 2MW Flywheel for Hybrid Locomotive Power – Proc. of the IEEE 58th Vehicular Technology Conference, Volume 5, 6-9 Oct 2003, pp. 3231-3235.
- [TRE07] **Tremblay O., Dessaint L. A., Dekkiche A. L.** 2007. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles – Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept. 9-12, 2007, pp. 284-289.
- [TSM99] **Teede- ja Sideminister.** 1999. Raudtee tehnokasutuseeskirja kinnitamine. Teede- ja sideministri 9. juuli 1999. a määrus nr 39 L – Riigi Teataja lisa, 16. sept 1999., anne 127, art 1773.
- [TTK07] **Tallinna Trammi- ja Trollibussikoondise Aktsiaseltsi 2007. majandusaasta aruanne.** Tallinna Linnavalitsuse 28. mai 2008. korralduse nr 976-k lisa 1, 10 p.
- [TTÜ08] **TTÜ elektriajamite ja jõuelektronika instituut.** 2008. Kergrööbassoidukite ajamid ja juhtimine. TTÜ kirjastus, 2008, 200 lk.
- [TUT07] **Tutzauer, R.** 2007. Neue Erfahrungen mit oberleitungslosen Straßenbahnen – Internationaler ETG-Kongress, Oct 23-24, 2007, pp. 387-392.
- [ULE05] **ULEV-TAP2.** 2005. Ultra Low Emission Vehicle - Transport using Advanced Propulsion 2. Public Report 12/2005, 17 p., <http://www.ulev-tap.org/>
- [ÜTA06] **Ühistranspordi arenguprogramm.** Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, 2006, 26 p.
- [VAN93] **Vanderlinde J.** 1993. Classical electromagnetic theory. Wiley, 1993, 384 p.
- [VIN05] **Vinnikov D.** 2005. Research, Design and Implementation of Auxiliary Power Supplies for the Light Rail Vehicles – Doctoral thesis on power engineering, electrical engineering, mining engineering, TTU Press, 2005, 74 p.
- [VIN06] **Vinnikov D.** 2006. Isolated DC/DC Converter Topology with a Three-Phase Intermediate AC-Link – Proc. of the 10th International Baltic Electronics Conference, Oct 2-4, 2006, pp 1-4.

- [WER07] **Werfel F. N., Floegel-Delor U., Riedel T.** 2007. Compact HTS 5 kWh/250 kW Flywheel Energy Storage System – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, June 2007, pp. 2138-2141.
- [WIT00] **Witt Industrielektronik GmbH.** 2000. Technischer Bericht. Schwungradspeicher, Ver. 1.02, 2000, 11p.
- [WOR98] **Worwood M. J.** 1998. Developments in D.C. Traction Power Supply Rectifiers – Proc. of the International Conference on Developments in Mass Transit Systems, 20 - 23 April 1998, pp. 291-295.
- [XUZ02] **Xu Z., Zhang B. et al.** 2002. The Emitter Turn-Off Thyristor-Based DC Circuit Breaker – Proc. of the IEEE Power Engineering Society winter Meeting, Jan 27-31, 2002, Vol. 1, pp 288-293.
- [ZHA08] **Zhao Y., Yao J., Zhong Z., Sun Z.** 2008. The Research of Powertrain for SuperCapacitor-based Series Hybrid Bus – Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept. 3-5, 2008, 4 p.

Autori publikatsioonid

1. Vinnikov, D.; Hõimoja, H.; Rosin, A.; Egorov, M. (2009). Load Leveling and Loss Minimization in Tram Systems - Possibilities and Challenges. *Техническая электродинамика. Тематический выпуск*, pp. 83 - 88.
2. Vinnikov, D.; Hõimoja, H.; Andrijanoviš, A.; Roasto, I.; Lehtla, T.; Klytta, M. (2009). An Improved Interface Converter for a Medium-Power Wind-Hydrogen System. In: *Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact (ICCEP'2009)*. June 9-11, 2009, Capri, Italy: IEEE Publishing, 2009, pp. 426 - 432.
3. Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Jalakas, T. (2009). Analysis and Design of Ultracapacitor-Boosted Back-Up Power Supply for Trams. In: *Proceedings of International IEEE Conference EUROCON'2009*. May 18-23, 2009, St.-Petersburg, Russia: IEEE., 2009, pp. 598 - 604.
4. Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Strzelecki, R. (2009). Application of Ultracapacitors in Low-Voltage Power Supply Systems of Light Rail Vehicles. In: *The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering, OJEEE Vol 1, No 1, July 2009: The 2009 World Congress on Electronics and Electrical Engineering, WCEEENG'09; Cairo, Egypt, 6.-8. April 2009.*, 2009, 5 pp..
5. Andrijanoviš, A.; Vinnikov, D.; Hõimoja, H.; Klytta, M. (2009). Comparison of Interface Converter Topologies for Small- or Medium-Power Wind-Hydrogen Systems. In: *6th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering"*, Doctoral School of Energy and Geotechnology. Kuressaare, Estonia, 12.01.-17.01.2009: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi, 2009, pp. 122 - 127.
6. Hõimoja, H.; Rosin, A. (2009). Optimization of Energy Flows in Public Electric Transportation. In: *6th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering"*, Doctoral School of Energy and Geotechnology. Kuressaare, Estonia, 12.01.-17.01.2009: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi, 2009, pp. 108 - 112.
7. Müür, M.; Möller, T.; Hõimoja, H.; Rosin, A.. (2009). Remote laboratory of electrical drives – PLC based control and algorithms. In: *6th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering"*, Doctoral School of Energy and Geotechnology. Kuressaare, Estonia, 12.01.-17.01.2009: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi, 2009, pp. 128 - 133.
8. Hõimoja, H. (2008). Hooratassalvestitest. *Keskkonnatehnika*, 3, lk. 30 - 33.
9. Hõimoja, H.; Möller, T.; Rosin, A.; Müür, M. (2008). Electrical Drives Remote Laboratory at the TUT. *5th International Symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering"* : doctoral school of energy and geotechnology, Kuressaare, Estonia, January 14-19, 2008: Tallinn: Tallinn University of Technology, 2008, pp. 177 - 182

10. Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Rosin, A. (2008). Control Basics of Flywheel-powered Uninterruptible Motor Drive. In: BEC 2008 : 2008 International Biennial Baltic Electronics Conference : Proceedings: 11th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn University of Technology, October 6-8, 2008, Tallinn, Estonia. Tallinn: Tallinn University of Technology, 2008, pp. 289 - 292.
11. Hõimoja, H.; Rosin, A.; Möller, T.; Müür, M. (2008). E-laboratory in the Field of Electrical Drives. In: Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008: 13th International Power Electronics and Motion Control Conference 2008, Poznan, 1.-3. september 2008. Poznan: IEEE, 2008, pp. 2028 - 2033.
12. Möller, T.; Rosin, A.; Hõimoja, H.; Müür, M. (2008). PLC Based Control of Remote Laboratory Experiments. In: BEC 2008 : 2008 International Biennial Baltic Electronics Conference : Proceedings: 11th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn University of Technology, October 6-8, 2008, Tallinn, Estonia. Tallinn: Tallinn University of Technology, 2008, pp. 273 - 276.
13. Lehtla, M., Hõimoja H. (2008). Slip Control Upgrades for Light-Rail Electric Traction Drives. In: Proceedings of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008: 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008, 1-3 September, 2008, Poznan, Poland. Poznan: IEEE, 2008, pp. 1581 - 1584.
14. Hõimoja, H. (2007). Uninterruptible Power Supply in Distribution Substations Auxiliary Circuits. 4th International Symposium "Topical problems of education in the field of electrical and power engineering". Doctoral school of energy and geotechnology : Kuressaare, Estonia, January 15-20, 2007: Tallinn University of Technology, Faculty of Power Engineering, pp. 78 - 82.
15. Kinetic Energy Storage Systems. In: 8th International Workshop on Research and Education in Mechatronics: 8th International Workshop on Research and Education in Mechatronics, Tallinn, 14-15.06.2007. Tallinn: Tallinn University of Technology Press, 2007, pp. 284 - 288.
16. Hõimoja, H. (2006). Flywheel energy storage: principles and possibilities. 3rd International Symposium "Topical problems of education in the field of electrical and power engineering": doctoral school of energy and geotechnology : Kuressaare, Estonia, January 16-21, 2006: Tallinn University of Technology, Department of Electrical Drives and Power Electronics, pp. 78 - 82.
17. Hõimoja, H. (2006). Kinetic Energy Storage in Electric Traction Applications. In: Tarptautines konferencijas Elektros ir vladymos technologijos - 2006 : pranešimu medžiaga – Proceedings of International Conference Electrical and Control Technologies - 2006: International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas, 4-5 May: 4 p.

Kokkuvõte

Väitekiri käsitleb kontaktliiniga seotud elektertranspordi (trammid, trollid, elektrirongid) energiatõhususe parendamisega seotud probleemide ringi. Tehnika taseme analüüsis kirjeldatakse Tallinna elektertranspordi infrastruktuuri ja võrreldakse selle arengutaset muu maailmaga. Tuuakse välja võimalused vähendada kontaktvõrgus elektrienergia ülekandmisega kaasnevaid kadusid, selgitatakse riistvaralise ja organisatoorse energiasäästu aspekte.

Kuna esmase analüüsi alusel on paindlikumaks energiatõhususe tõstmise viisiks energia salvestamine, mis lisaks keskpingevõrgust tarbitava võimsuse ajalisele ühtlustamisele lubab säästu ka taaskasutatava pidurdusenergia arvel, on suurem osa väitekirjast pühendatud energiasalvestite tehnoloogiatele, nende parameetrite arvutusele Tallinna elektersõidukite näitel ja tehniliste lahenduste siirdamisele muudesse valdkondadesse. Eraldi peatükk on pühendatud ülikondensaatorite kasutusvõimalusele kergrööbassõidukite väikepingeahelate töökindluse tõstmisel.

Väitekirja koostamisel tehtud uurimistöö tulemused on rakendatavad elektertranspordi energiatõhususe parendamisel globaalses ulatuses. Statistilisel analüüsil põhinevad energiatõhususe hindamise ja energiasalvestite arvutuse meetodid lubavad valimite piisava representatiivsuse korral saada asjakohasemaid tulemusi kui lihtsustatud simulatsioonimudelid. Linna elektertranspordi energiasalvestite arvutusmetoodika on laiendatav ka hübriidveoajamiga ja kütuseelementidega sõidukitele.

Abstract

The doctoral thesis brings out the problematic issues related to the energy efficiency amelioration of catenary-fed electric transportation (trams, trolleybuses, electric trains). The state-of-the art analysis describes the electric traction infrastructure in Tallinn and its development level in comparison with the rest of the world. The general possibilities of reducing the energy transfer losses in catenary network as well as the aspects of hardware and software energy saving methods are explained.

As the primary analysis shows that the most flexible way of increasing the energy efficiency is the energy storage, which, in addition to the leveling of the burden on the medium-voltage grid promises savings thanks to regenerative energy recycling, the rest of the thesis is dedicated to the storage technologies, to their parametric calculations based on the examples of the vehicles in Tallinn and to the technology transfer possibilities. A separate chapter is dedicated to the enhancing of the performance of the functional extra-low voltage circuits in the light rail vehicles by the use of ultracapacitors.

The results, achieved during the compilation of current thesis are applicable to the enhancement of the energy efficiency of electric transportation in a global scale. The energy efficiency and storage calculation methods, based on the statistical analysis, help to achieve more relevant parameters than simplified simulation models. These calculation methods, designed for urban electrical transportation, can be transferred to the vehicles with hybrid traction drive and to the vehicles with the fuel cell supply.

Elulookirjeldus

1. Isikuandmed

Ees- ja perekonnanimi Hardi Hõimoja
Sünniaeg ja -koht 14.03.1975., Tallinn
Kodakondsus eesti

2. Kontaktandmed

Address Akadeemia tee 24a-12, 12611 Tallinn
Telefon 6203 709
E-posti address hardi.hoimoja@ttu.ee

3. Hariduskäik

Õppeasutus (nimetus lõpetamise ajal)	Lõpetamise aeg	Haridus (eriala/kraad)
Tallinna Tehnikaülikool	1998	elektriamid ja jõuelektroonika, diplomiinsener

4. Keelteoskus (alg-, kesk- või kõrgtase)

Keel	Tase
eesti	kõrg
saksa	kõrg
vene	kesk
prantsuse	alg
inglise	kesk

5. Teenistuskäik

Töötamise aeg	Tööandja nimetus	Ametikoht
2007. – ...	TTÜ elektriamite ja jõuelektroonika instituut	insener
1999. – 2007.	AS Harju Elekter Elektrotehnika	müügiinsener

6. Teadustegevus

Kaitstud lõputööd

Trammi veoajami moderniseerimine (1998., diplomitöö)

Teadustöö põhisuunad

Energiasalvestus ja -sääst

Teised uurimisprojektid

1. Diiselelektriliste manöövervedurite energiavoogude hindamine veoajami energiasäästu ja töökindluse suurendamise eesmärgil.
2. Energiamuundus- ja -vahetusprotsesside uurimine elektriajamate ja pooljuhtmuundurite jõuvõrkudes.
3. Energiasalvestid ja nende kasutusvõimaluste uurimine Eestis.
4. E-õppelabori väljaarendamine elektriajamate ja jõuelektroonika valdkonnas TTÜs ja TTÜ kollidžites.
5. Kahesuunalist juhitavat energiavahetust võimaldavad muundurid elektrienergia salvestamiseks.

Curriculum Vitae

1. Personal data

Name Hardi Hõimoja
Date and place of birth March 14, 1975, Tallinn

2. Contact information

Address Akadeemia tee 24a-12, 12611 Tallinn
Phone 6203 709
E-mail hardi.hoimoja@ttu.ee

3. Education

Educational institution	Graduation year	Education (field of study/degree)
Tallinn University of Technology	1998	electric drives and power electronics, diploma engineer

4. Language competence/skills (fluent; average, basic skills)

Language	Level
Estonian	fluent
German	fluent
Russian	average
French	basic skills
English	average

5. Professional Employment

Period	Organisation	Position
2007 – ...	Tallinn University of Technology, department of electric drives and power electronics	engineer
1999 – 2007	Harju Elekter Elektrotehnika, Ltd	sales engineer

6. Scientific work

Defended theses

Modernization of tram traction drive (1998., diploma thesis)

Main areas of scientific work/Current research topics

Energy storage and efficiency problems

Other research projects

1. Assessment of energy flows in diesel electric shunting locomotives for increasing the energy efficiency and reliability of the traction drives.
2. Research of the energy conversion and exchange processes in the power buses of electric drives and semiconductor converters.
3. Research of the energy storage units and their possible applications in Estonia.
4. Development of e-laboratories in the field of electric drives and power electronics for the Tallinn University of Technology and its colleges.
5. Research of bidirectional controlled converters for energy storage units.

THESIS ON POWER ENGINEERING,
ELECTRICAL ENGINEERING, MINING ENGINEERING D42

**Energy Efficiency Estimation and
Energy Storage Calculation Methods for
Urban Electric Transportation**

HARDI HÕIMOJA

TUT
PRESS

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Power Engineering
Department of Electrical Drives and Power Electronics

Dissertation was accepted for the defence of the degree of Doctor of Philosophy in Energy and Geotechnology on November 19, 2009.

Supervisor:

Professor Dr. Sc. techn. Juhan Laugis,
Tallinn University of Technology

Opponents:

Professor Dr. habil. Sc. ing. Leonids Ribickis,
Full member of the Latvian Academy of Science, Director of Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Riga Technical University

Professor Dr. habil. Algirdas Smilgevičius,
Vilnius Gediminas Technical University

Cand. techn. Tõnu Pukspuu,
OÜ SystemTest

Defence of the thesis:

December 18, 2009 at 10:00
Room No.: VII-430
Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5, Tallinn, Estonia

Declaration: Hereby I declare that this doctoral thesis, my original investigation and achievement, submitted for the doctoral degree at Tallinn University of Technology has not been submitted for any academic degree.

/Hardi Hõimoja/

Contents

Introduction	5
Technical background.....	5
Topicality of the theme	5
Main aims and tasks of research	6
Used research methods and tools.....	6
Scientific novelty	6
Practical significance of the research.....	6
Dissemination of results.....	7
1. State-of-the-art.....	7
1.1. Energy efficiency by regenerative traction converters in substations	7
1.2. Energy savings by using energy storage units in traction substations.....	9
1.3. Energy efficiency issues in traction power distribution	9
1.3.1 Increasing energy efficiency by load sharing.....	10
1.3.2 Energy savings by track-side storage substations	10
1.3.3 Energy savings by transition to a higher voltage level.....	11
1.4. Energy savings by the onboard energy storage units.....	11
1.5. Contribution of the real-time traffic management and ecodriving	12
1.6. Conclusion of the energy efficiency state-of-the-art analysis	12
2. Classification and analysis of the energy storage methods.....	12
2.1. Requirements on the storage units.....	12
2.2. Comparative analysis of storage media	13
2.3. Control of storage energy exchange	13
2.3.1 Energy exchange states	13
2.3.2 Estimation of the ESU rechargeability/dischargeability	14
2.3.3 Power deficiency and overflow detection	15
2.3.4 Generalized control rule set of an ESU.....	16
3. Energy efficiency estimation and storage calculation methods	16
3.1. Power histograms	17
3.2. Voltage histograms	19
3.3. A statistical evaluation method for the load power and voltage.....	19
3.3.1 A storage calculation method based on the low-pass filter analogy	20
3.3.2 ESU parameter calculations for supply load leveling	20
3.3.3 Storage parameters for catenary voltage stabilization.....	21
3.3.4 Recycling of braking energy	22
3.3.5 Storage power and capacity for catenary-free operation.....	23
3.4. Storage calculation examples	23
3.4.1 Supply load leveling.....	23
3.4.2 Catenary voltage stabilization	25
3.4.3 Braking energy recycling	27
3.4.4 Catenary-free operation.....	27
3.5. Ultracapacitive storage dimensioning.....	28
3.6. Pay-off time calculation examples	29

3.6.1	Pay-off time calculation of a tram's onboard storage unit	29
3.6.2	Pay-off time calculation of a stationary substation storage unit.....	30
4.	Application of ultracapacitors in extra-low-voltage circuits of a tramcar	31
4.1.	Description of extra-low-voltage circuits	31
4.1.1	Main back-up battery	31
4.1.2	Combined ultracapacitor-electrochemical battery.....	32
4.2.	Analysis of load currents of the extra-low-voltage circuits.....	32
4.3.	Battery-ultracapacitor interconnections.....	33
4.4.	A case study.....	34
4.4.1	Sizing of ultracapacitor module for combined energy storage.....	36
4.4.2	Selection of the ultracapacitor modules	36
4.4.3	Simulation results.....	36
4.5.	Benefits of ultracapacitors in the extra-low-voltage circuits.....	38
5.	Technology transfer possibilities	39
5.1.	Energy savings in diesel-electric drives	39
5.2.	Assistance for fuel cells	42
	Conclusions and recommendations	42
	References	44

Introduction

Technical background

The main problems of contemporary energy-hungry society are steep fluctuations in consumption: short-time power peaks are mirrored in the overdimensioned infrastructure. The idea of load leveling by the means of storage buffers is well known, but hard to implement, especially in kWh and MW ranges. The leveling and buffering problems do not exist in public transmission and distribution networks only. In electric traction high power is needed during acceleration, in a steady state the consumption is remarkably lower, about 10 % of the maximum, while surplus of energy is generated during braking. In the past, the braking energy was dissipated as heat on resistances. Today it is converted back to electricity by changing the traction drive over into a generator mode, whereas the economized energy must be stored for the next acceleration. Today the conventional electrochemical batteries are challenged by other storage means, like double-layer capacitors and flywheels. The two mentioned technologies have already found a broad application abroad, where the experience gathered so far reveals their positive influence on energy efficiency.

The application of energy storage is not the only method of enhancing the energy efficiency. The main goal – guaranteeing the quality of transportation services with less energy – is also possible with the use of other technical and non-technical means. This list is populated by controlled and regenerative traction substations, load sharing between catenary sections, real time traffic management and ecodriving. The best results while planning an energy-efficient electric transportation system are achieved by the co-action of the technical and non-technical means to make the benefits of both maximally available.

Though this thesis deals with the catenary-fed electric transportation, the results obtained and conclusions drawn can be transferred to the hybrid electric vehicles and vehicles moving only on the stored energy.

Topicality of the theme

The global prioritization of electric transportation is a key issue in many framework documents concerning public transportation. As a part of sustainable energy technologies, the energy-efficient electric transportation issues have been echoed in the EU Ecodesign Directive 2005/32/EC [EUR05] as well as in the Estonian Energy Technology Program [ENE08].

The second factor explaining the importance of the topics covered in the current thesis is the continuity of previous research concerning energy efficient electric transportation. Necessitated by the continuous growth of knowledge and technology, R&D activities in the field of electric traction must be pursued as an uninterrupted chain. Demonstrated by the state-of-the-art analysis, the electric transportation system in Tallinn needs major modernization, which can be effectively conducted only in cooperation with the research institutions.

Main aims and tasks of research

1. Assessment of the general technological level of the electric transportation system in Tallinn, including its energy efficiency.
2. Mapping the technologies used in the energy storage units as the most modern hardware of increasing energy efficiency in the catenary-fed electric transportation.
3. Development of the energy storage calculation methodologies for the vehicles based on the statistical data analysis.
4. Assessment of the influence of the energy storage units with high specific power to the performance of the extra-low-voltage onboard circuits.
5. Suggestions of the technology transfer possibilities of the proposed technical solutions and calculation methodologies.
6. Conclusions and proposals for increasing the energy efficiency in the Tallinn electric transportation system and suggestions for further research.

Used research methods and tools

The reproductive part, including the state-of-the-art analyses, is based upon the materials published in the scientific literature and conference proceedings.

The productive part, including the energy storage parameter calculations, is based upon the data samples recorded during the previous research projects. The influence of additional storage units on the performance of extra-low-voltage circuits is analyzed by means of simulation software.

For the statistical analysis, the spreadsheet program *Excel* by *Microsoft* with *Visual Basic for Applications (VBA)* was used. The simulations were carried out by using the *MATLAB Simulink* software package by *MathWorks*.

Scientific novelty

1. There has been created an expert model based analysis methodology for the energy efficiency of an urban electric transportation system.
2. A calculation method for electric transportation energy storage units based on the input data statistical analysis has been worked out.
3. A method for increasing the reliability of the extra-low voltage circuits of a light rail vehicle by using additional high specific power energy storage has been proposed.

Practical significance of the research

The energy storage calculation method as the main research outcome helps the operator companies drawing conclusions on the energy efficiency of their vehicles and infrastructure. As the calculation methodology is based on the statistical approach, no procurement of additional design software packages is necessary. Thus, the proper energy storage units can be selected more easily, their use helps to decrease the losses in the catenary and finally energy consumption from the

medium voltage grid. The calculation method is also applicable to the hybrid drives for a proper dimensioning of the primary energy unit.

Dissemination of results

- 1 Vinnikov, D.; Hõimoja, H.; Rosin, A.; Egorov, M. (2009). Load Leveling and Loss Minimization in Tram Systems - Possibilities and Challenges. *Техническая электродинамика. Тематический выпуск*, pp. 83 - 88.
- 2 Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Jalakas, T. (2009). Analysis and Design of Ultracapacitor-Boosted Back-Up Power Supply for Trams. In: *Proceedings of International IEEE Conference EUROCON'2009*. May 18-23, 2009, St.-Petersburg, 2009, pp. 598 - 604.
- 3 Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Strzelecki, R. (2009). Application of Ultracapacitors in Low-Voltage Power Supply Systems of Light Rail Vehicles. In: *The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering, OJEEE Vol 1, No 1, July 2009: The 2009 World Congress on Electronics and Electrical Engineering, WCEEENG'09, 6.-8. aprill 2009. Cairo, 2009, 5 p.*
- 4 Hõimoja, H.; Rosin, A. (2009). Optimization of Energy Flows in Public Electric Transportation. In: *6th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Doctoral School of Energy and Geotechnology, 12.01.-17.01.2009.*, pp. 108 - 112.
- 5 Hõimoja, H.; Vinnikov, D.; Rosin, A. (2008). Control Basics of Flywheel-powered Uninterruptible Motor Drive. In: *Proceedings of the 11th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn University of Technology, October 6-8, 2008, Tallinn*, pp. 289 - 292.
- 6 Hõimoja, H.; Lehtla, M. (2007). Kinetic Energy Storage Systems. In: *8th International Workshop on Research and Education in Mechatronics, Tallinn, 14-15.06.2007*. pp 284 - 288.
- 7 Hõimoja, H. (2006). Kinetic Energy Storage in Electric Traction Applications. In: *Tarptautines konferencijas Elektros ir vladymos technologijos - 2006 : pranešimu medžiaga – Proceedings of the International Conference on Electrical and Control Technologies - , Kaunas, 4-5 May 2006.*, 4 p.

1. State-of-the-art

1.1. Energy efficiency by regenerative traction converters in substations

Presently, diode rectifiers and power transformers are integrated into one installation with M3.2UK topology, i.e. the solutions having two double-star secondary windings with an interphase transformer combined with a common-cathode six phase half-wave rectifier (Fig. 1). Modern rectifiers have more reliable and effective 6- or 12-pulse bridge topologies with connection schema depending on traction currents and voltage levels (Fig. 2).

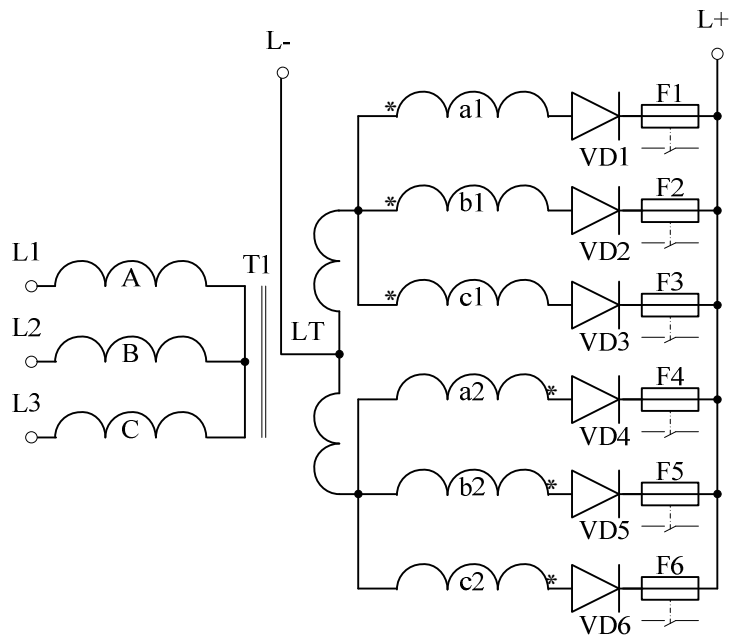


Fig. 1. Traction rectifier topology used currently

Regarding energy flows optimization, under certain circumstances it might be reasonable to use controlled thyristor rectifiers with regeneration possibilities to the medium voltage distribution grid. With forced commutation, overcurrent and short-circuit protection can be implemented without additional mechanical components. Voltage regulation allows installing fewer substations along the track [FLO95] [SIE09].

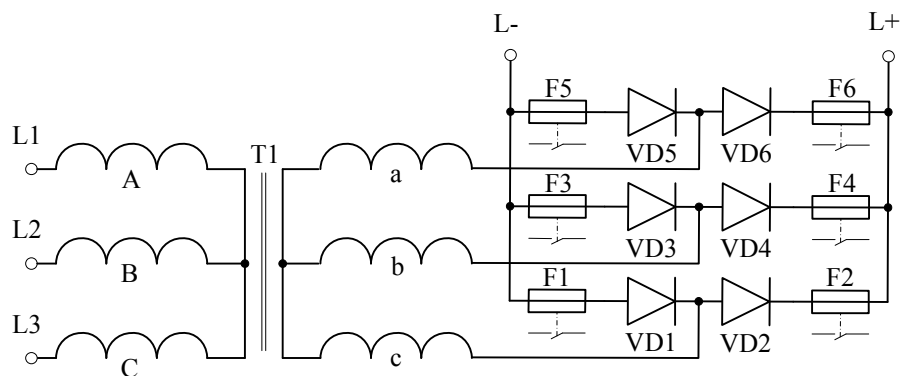


Fig. 2. A B6 bridge traction rectifier topology

Existing DC substations with diode rectifiers can be retrofitted with regeneration inverters (Fig. 3). These inverters are connected parallel to the main rectifier and serve to inject braking energy into mains. During earlier investigations, it was found out that the rectifier-inverter power ratio varies from

1:3 on the inclinations to 1:33 on a flat terrain [SUZ82]. The present experience shows that the energy injected back to the medium voltage grid can make up to 40 % of the consumed energy [MEI07] [SUZ82].

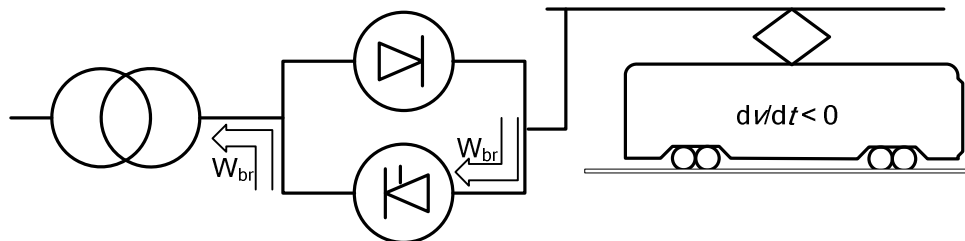


Fig. 3. Braking energy flows through an antiparallel inverter [MEI07]

1.2. Energy savings by using energy storage units in traction substations

If the medium voltage operator denies the regenerative power injection to the grid, the braking energy can be recycled by a stationary storage unit ESU connected to the traction substation's DC busbars (Fig. 4). The energy savings are estimated to range from 20 % [ROS06] to 40 % [SIE09]. In addition to the recycling of the braking energy, the stationary ESU provides load leveling, while the simultaneous acceleration of multiple vehicles causes voltage drops and sometimes the tripping of protection apparatus in the substations. A drawback of such centralized storage is that the energy transfer losses in the catenary remain the same.

1.3. Energy efficiency issues in traction power distribution

Supply of the electric transportation (trolleybuses, trams, trains) in Tallinn is based on contact wires, the efficiency of which in optimal cases reaches up to 93 %...96 %. On the other hand, there are periods when the efficiency drops to 60 %...70 %. This leads to higher power losses in the network, which results in overheating and wear of the overhead lines [MÄG07].

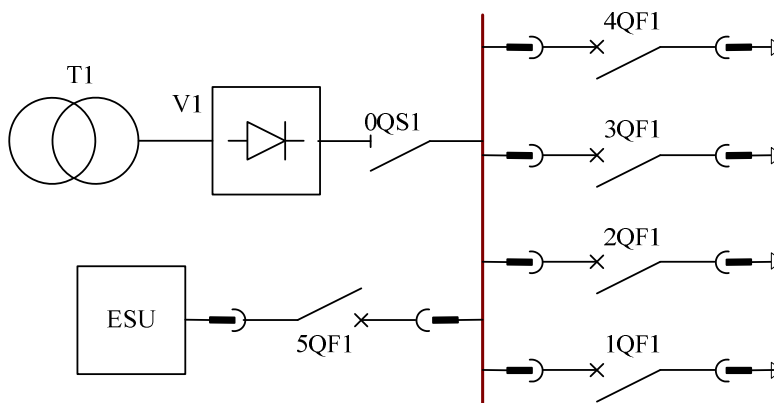


Fig. 4. An ESU connected to the traction substation's DC busbars

1.3.1 Increasing energy efficiency by load sharing

To minimize voltage drops along the catenary, the load can be transferred from one section to less loaded adjacent one within the service area of one or more substations; basically it means interconnecting line sections. In such cases, protection coordination must be guaranteed, i.e. the intersection circuit breaker must have the fastest tripping characteristic. This can be implemented by applying force-commutated triacs with a di/dt sensing circuit, as proposed by some authors [XUZ02]. Load sharing between two adjacent substations TS_1 and TS_2 can be illustrated by Fig. 5.

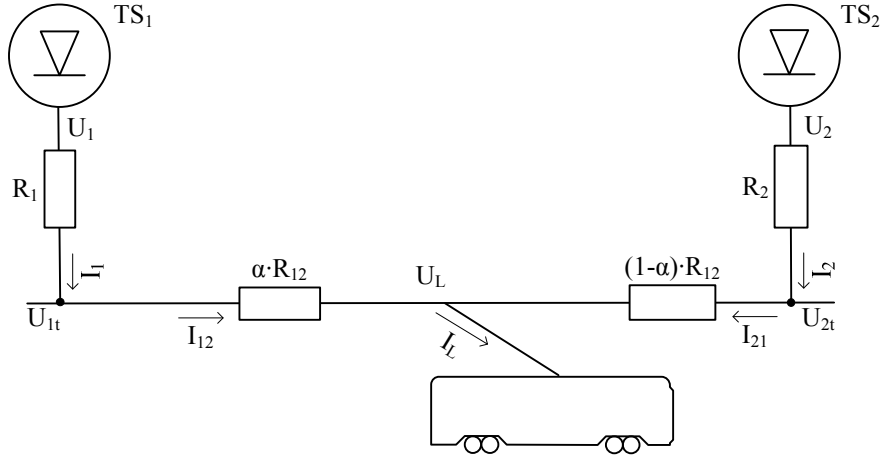


Fig. 5. Load sharing between two adjacent substations

Termination voltages U_{1t} and U_{2t} differ from busbar voltages U_1 and U_2 thanks to voltage drops in the cables, represented by series resistances R_1 and R_2 . The contact wires and rails between the feeding points build up an equivalent resistance R_{12} . In practice, cable resistances can often be considered negligible compared to those of contact wires. Currents drawn from adjacent substations can be expressed by

$$I_1 = \frac{(1-\alpha) \cdot R_{12} + R_2}{R_1 + R_{12} + R_2} \cdot I_L \quad (\text{Eq. 1})$$

$$I_2 = \frac{\alpha \cdot R_{12} + R_1}{R_1 + R_{12} + R_2} \cdot I_L$$

where I_L is the vehicle's load current and α per unit (% / 100) distance from substation TS_1 to TS_2 . If more substations are connected to the common ring network, additional formulas can be applied; if thyristor substations are used, the load can be more effectively shared by the voltage control [SAG04].

1.3.2 Energy savings by track-side storage substations

To compensate voltage drops in long lines, it is possible to use ESU, which can be placed into separate installations (Fig. 6) [DES07] [RUF04]. Unlike to ESU integrated into traction substations, the storage substations' primary task is voltage

stabilization and regenerative energy recycling. They are usually connected to the line ends, in combination with the load transfer function they can to some extent substitute a failed traction substation or a substation undergoing maintenance. To compensate voltage drops, the power ratings must be chosen according to the dissipation in contact wires and are therefore smaller than those used for load leveling. The energy savings are estimated to be around 5 % [HAL02] [ROS06].

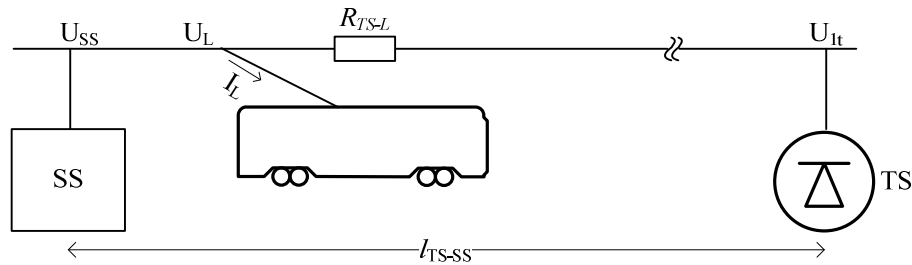


Fig. 6. Voltage stabilization in the catenary end [HAL02] [RUF04]

1.3.3 Energy savings by transition to a higher voltage level

At a higher voltage level the same power can be transferred with less current, thus reducing the dissipation losses. As the standard [EVS05] recommends using 750 V instead of 600 V for the new catenaries, the currents would decrease by 25 % and the power losses thanks to the square dependency, to 64 % of the present values. This approach is not applicable for the existing electric transportation systems, as it would require major reconstructions both in the infrastructure and in the vehicles.

1.4. Energy savings by the onboard energy storage units

An obvious advantage of the onboard energy storage is the fact that most of energy exchange during dynamic processes occurs outside the contact wire, keeping its load more stable and accordingly minimizing voltage fluctuations. As reported by rolling stock operators, 40 % of dynamic power can be drawn from the storage unit [GIZ08] [STE07]. In addition to the covering of dynamic loads, the use of onboard storage units may have benefits regarding the whole infrastructure:

1. Reduced number of feeding points and substations along the catenary.
2. Reduced cross-section of DC conductors thanks to the decreased peak loads.
3. Possibility of operating the vehicles with more powerful traction drives without rearrangements in the infrastructure.
4. Reduced energy consumption from the medium-voltage grid. As the energy released during regenerative braking depends on the vehicle's mass and velocity squared, the regenerative energy is recycled more effectively in the rail vehicles.
5. The vehicle's movement can partly be made possible also in catenary-free track sections.
6. Reduced wear of contact wires caused by arcing between contaminated, icy or loose contact surfaces.

1.5. Contribution of the real-time traffic management and ecodriving

This option relates to the so-called “soft” measures for energy flow control, also known as demand-side management. The method includes real-time data acquisition from the substations and the vehicles and determining priorities on the basis of timetable and available power. Such administrative means [RAW08] allow the following:

1. No simultaneous acceleration of multiple vehicles is allowed, reducing the possibility of substation overloads and voltage drops.
2. The sections can be interconnected for the load sharing as described in the previous chapter.
3. Traffic lights can be controlled to ensure the most effective course with minimum acceleration-deceleration parts.

The demand-side load management can as well be implemented on a single vehicle, basically it means controlling power demand by acceleration limitation. Peak loads are frequently determined by the human factor, i.e. the driving style of an individual driver. This “soft” load management method, often described as “ecodriving”, can be briefly characterized as reducing the human participation in driving and allowing the onboard computer calculate the smoothest trajectory [GUN05] [LIN04].

1.6. Conclusion of the energy efficiency state-of-the-art analysis

Optimization of energy flows in public electric transportation might be implemented on different levels: substations, contact lines and vehicles. Hard methods require an intervention to existing installations, like retrofitting with additional switches and energy storage; soft means in turn are of administrative character and biased towards demand-side management. To achieve the best performance, these methods can be combined on the basis of cost and efficiency analysis. The most universal, but also most costly method to mitigate the problems persistent in public electric transportations appears to be the onboard energy storage; the second group in this ranking is the stationary storage units whose only drawback is the energy transfer loss.

2. Classification and analysis of the energy storage methods

2.1. Requirements on the storage units

As the energy storage units for the electric traction are primarily meant for covering the dynamic processes, the first requirements are high power and short response time. The capacitance is determined by the duration of such dynamic processes and necessary autonomy distance, if required. The general criteria while selecting an energy storage unit are as follows:

1. The effective capacity and power must respond to the given task.
2. The space for ESU is limited, especially on board of a vehicle.

3. The onboard installation must not negatively influence the vehicle's performance.
4. The vehicle's construction must withstand the additional mechanical load caused by the storage unit.
5. The energy storage unit must have an acceptable pay-back period.

From the space and weight limitations it may be concluded that the energy storage technologies applicable for electric transportations must have good gravimetric and volumetric power characteristics.

2.2. Comparative analysis of storage media

In respect to the specific power, ultracapacitors and in terms of specific energy, lithium-polymer batteries are of state-of-the-art [KIM08] [SAF08]. Concerning light cars where long distance and short charging time play a major role, lithium-based batteries are prospective [OGA07]. The use of lithium batteries on trolleybuses and rail vehicles is presently not attractive due to high investment costs. While the technologies mature and the prices lower, the lithium batteries may find an ampler use on catenary-fed vehicles thanks to their smaller dimensions at the same capacity. The flywheel technology can be considered as a compromise between the high specific power of the ultracapacitors and high energy of the electrochemical batteries with a decreasing number of references [ULE05] [WER07]. The cost per kW and kWh is continuously changing with the market penetration rate, the more precise economic criteria are considered to be the price per a complete discharge-recharge cycle derived from the total cost of ownership (TCO) [ESA07] [ROS06].

2.3. Control of storage energy exchange

2.3.1 Energy exchange states

The energy exchange states are determined by the load and the storage's state of charge (SOC) [EHS05]:

1. In the combined traction mode when additional power is demanded. This occurs during accelerations or moving uphill, when both the primary power line and the electricity storage unit (ESU) supply tractive power.
2. In the ESU-alone traction mode where the power demand is matched solely by the storage unit. This can occur during the autonomous operation or during the primary power line failures.
3. In the primary power line traction mode when the tractive power is supplied only by the primary line. This is a case when the load power stays within certain limits or when the ESU cannot participate in the energy exchange process.
4. With the ESU recharge and traction drive supply from the primary power system when the total load stays below a setpoint value and the ESU is not fully charged.

5. With storage of the braking energy when the load power becomes negative and the ESU is not yet fully charged.

2.3.2 Estimation of the ESU rechargeability/dischargeability

To preserve the ESU's ability to participate in the energy exchange processes, its state of charge (SOC) must be kept within certain limits. In controlling the energy balance, the maximal SOC (SOC_{max}) or thermostat control can be applied.

The SOC_{max} control strategy is considered proper for vehicles for which the performance relies heavily on the ESU and is based upon the needs of both matching the peaks in power demand and keeping the SOC of the ESU at the highest possible level. If braking energy recycling is required as well, it is reasonable to set two SOC upper limits – SOC_{hi} for the low rate recharge from the primary power system and SOC_{max} – for the high rate recharge from regenerative braking (Fig. 7).

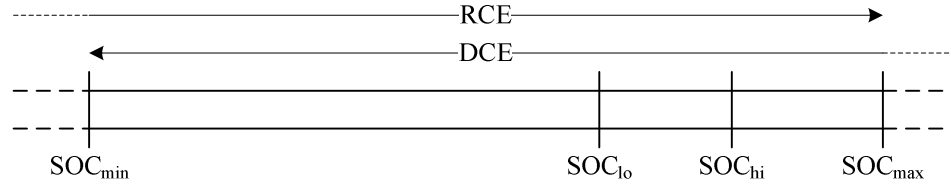


Fig. 7. Recharge and discharge areas of an ESU

In the same figure, the “recharge enabled” area RCE and “discharge enabled” area DCE are depicted. The low-rate recharge from the primary grid is allowed while $SOC(t) \leq SOC_{hi}$ and regenerative power absorption while $SOC(t) < SOC_{max}$. The ESU can be discharged while $SOC(t) > SOC_{min}$. A disadvantage of keeping the SOC_{max} is a less effective use of the storage capacity. If the ESU is supposed to recycle regenerated energy only, then $SOC_{hi} = SOC_{max}$.

Instead of keeping SOC_{max} or SOC_{hi} , the SOC may be allowed to fluctuate between two levels, like SOC_{lo} ja SOC_{max} (Fig. 7), i.e. to use thermostat control with braking energy storage priority. In this case, the recharge is inhibited after reaching the SOC_{max} and the low-rate recharge from the primary system is reinitiated after falling to the SOC_{lo} , but the absorption of the braking energy is always possible if the ESU is not full. As the probability of the ESU of being fully charged is smaller than by keeping SOC_{max} , the ESU is more likely to be able to absorb the braking energy. Discharge is allowed while $SOC(t) > SOC_{min}$. In a boundary case, when $SOC_{lo} \approx SOC_{max}$, the estimation of rechargeability/dischargeability becomes similar to the SOC_{max} method.

The method of estimating the rechargeability/dischargeability can be formularized by a Boolean expression, where the variables RCE and DCE possess Boolean values, i.e. $RCE \in \{0;1\}$ ja $DCE \in \{0;1\}$, the same can be said about regenerative braking status variable $RB \in \{0;1\}$. The rechargeability by keeping the SOC_{max} is expressed by

$$RCE = RB \wedge (SOC(t) < SOC_{max}) \vee (SOC(t) < SOC_{hi}) \quad (\text{Eq. 2})$$

and by the *SOC* thermostat control by

$$RCE = (SOC(t) \leq SOC_{lo}) \vee RCE \wedge (SOC(t) < SOC_{max}) \vee RB \wedge (SOC(t) < SOC_{max}) \quad (\text{Eq. 3})$$

The dischargeability for both methods can be estimated by

$$DCE = (SOC(t) > SOC_{min}) \quad (\text{Eq. 4})$$

2.3.3 Power deficiency and overflow detection

The control interface of the ESU must initiate the energy exchange process if there is power overflow or deficiency in the power bus and if the SOC has reached a certain level, for this reason corresponding circumstances must be detected (Fig. 8). Power deficiency or the Boolean value of the corresponding variable *PD* can be detected according to the increase of supply current $i_S(t)$ over an upper threshold $I_{S,hi}$ or according to the power bus voltage $u_{PB}(t)$ fall under a lower threshold $U_{PB,min}$.

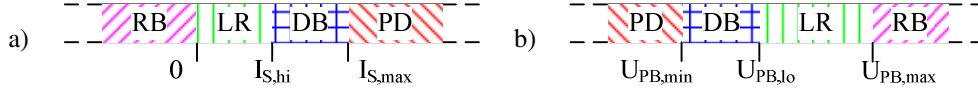


Fig. 8. Current- (a) and voltage-based (b) power deficiency and overflow detection

Voltage monitoring is the only power deficiency detection option in track-side storage substations where no information about traction substation output currents exist. Control decisions based on the current values can be made near the traction substations where the voltage drops are marginal or onboard, where the power deficiency becomes obvious both by the current increase and the voltage drop. As formularized,

$$PD = (i_S(t) > I_{S,max}) \vee (u_{PB}(t) < U_{PB,min}) \quad (\text{Eq. 5})$$

The Boolean value of the regenerative braking variable *RB* can be detected by the voltage increase on the load's terminals, accompanied by the change of current direction between the power bus and the traction drive.

$$RB = (u_{PB}(t) > U_{PB,max}) \vee (i_S(t) < 0) \quad (\text{Eq. 6})$$

Until the supply current and the catenary voltage remain within a specified window, the ESU is in the standby mode, allowing low-rate recharging expressed by a Boolean variable

$$LR = (i_S(t) \geq 0) \wedge (i_S(t) \leq I_{S,hi}) \wedge (u_{PB}(t) \geq U_{PB,lo}) \wedge (u_{PB}(t) \leq U_{PB,hi}) \quad (\text{Eq. 7})$$

To increase stability, current and voltage deadbands *DB* can be set (Fig. 8a and Fig. 8b) to avoid oscillation between recharging and discharging modes. The described threshold values can be either constant or dynamically changing according to the overall power balance of the network, determined by a traffic real time management system.

2.3.4 Generalized control rule set of an ESU

While implementing current-based energy flow control, the control rule set can be analytically expressed according to the power bus status and the rechargeability/dechargeability of the ESU.

$$i_{ESU}(t) = (I_{S,max} - i_S(t)) \cdot PD \cdot RCE + \\ + RCA \cdot [(I_{S,hi} - i_S(t)) \cdot LR + i_S(t) \cdot RB] \quad (\text{Eq. 8})$$

The voltage-based control is based on controlling the ESU current in an inner loop so that the power bus voltage value remains within a specified window.

$$i_{ESU}(t) = i_{ESU}(u_{PB}(t) = U_{PB,min}) \cdot PD \cdot RCE + \\ + i_{ESU}(U_{PB,lo} \leq u_{PB}(t) \leq U_{PB,hi}) \cdot LR \cdot RCA + \\ + i_{ESU}(u_{PB}(t) = U_{PB,max}) \cdot RB \cdot RCA \quad (\text{Eq. 9})$$

To fulfill the control rule set, multi-loop circuits are used, which, according to the acquired measurements, form a control action to reach the desired objective. The simplified control diagram of ESU energy exchange (Fig. 9) illustrates how the control interface CI calculates the setpoint values i_{ref} ja u_{ref} from $SOC(t)$, power bus voltage $u_{PB}(t)$, supply current $i_S(t)$ and forms the control actions CA for the power interface PI, which finally drives the energy flows between the power bus PB and the storage medium SM. The control loops for ultracapacitors are more thoroughly described in [CHE06] [LIU09] [LOH04] and for the flywheels in [CHA07] [FUX07].

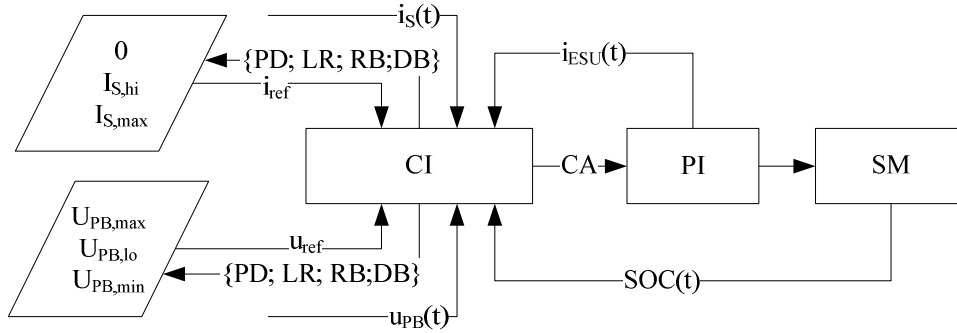


Fig. 9. Simplified energy exchange control diagram of an ESU

3. Energy efficiency estimation and storage calculation methods

To calculate the parameters for an ESU, its priority task must be known initially [FLA05] [STE04]:

- 1) leveling of the supply power;
- 2) recycling of the braking energy;
- 3) stabilization of the catenary voltage;
- 4) autonomous operation without the catenary.

The calculation results are different power/energy pairs $\{P_{ESU,i}; W_{ESU,i}\}$, where i is the task number. If multiple requirements must be satisfied, the power-energy pair members are selected from among the maximum values of single solutions, i.e. $\{P_{ESU}; W_{ESU}\} = \{\max(P_{ESU,i}); \max(W_{ESU,i})\}$.

Several possibilities of finding the input data for storage parameter calculation exist, depending on whether the ESU is onboard or stationary, either being designed or undergoing modernization. As for existing catenaries and vehicles, statistical analysis of supply powers and voltage may be applied: this approach is used in the thesis. While designing new electric transportation routes, software packages modeling losses and load power based on supposed traffic conditions can be used.

The data samples used for the storage parameter calculations were obtained from the previous research activities, where the loads and voltages of trams, trolleybuses, electric trains and traction substations were recorded [BOI01] [JOL98] [MÖL05].

3.1. Power histograms

The load power of electric vehicles and traction substations depends on several factors, many of which are difficult to forecast. As for the vehicles, the major factors determining the load power depend on [EHS05]:

- 1) vehicle's velocity,
- 2) track profile,
- 3) vehicle's acceleration.

The two first components in the list determine the tractive resistance; the third determines the dynamic resistance. A substation's load is summed up by the loads of individual vehicles within the substation's service area. The only non-changeable factor – the changes in track profile – causes the so-called macro-cycles in the load diagrams. The small amplitude micro-cycles characterize operation at constant speeds, the high amplitude micro-cycles mirror short-time peak loads caused by the vehicle's acceleration.

The distribution of load power over a data sample is graphically expressed by the histograms which help to draw conclusions on the track and the driving habits. Smaller weights of trolleybuses yield smaller amplitudes of their micro-cycles (Fig. 10), compared to the trams (Fig. 11). For the same reason, the electric trains show the highest amplitude micro-cycles thanks to the rolling stock mass (Fig. 12).

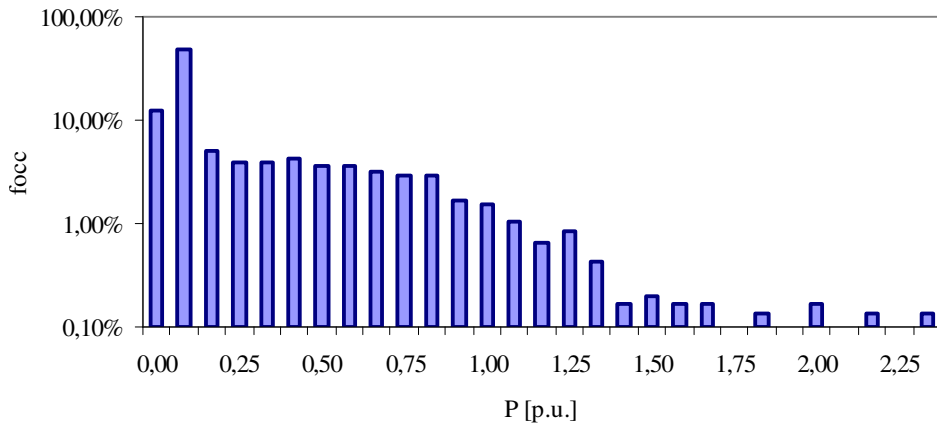


Fig. 10. Power histogram of a trolleybus moving along the route *Kaubamaja-Mustamäe*

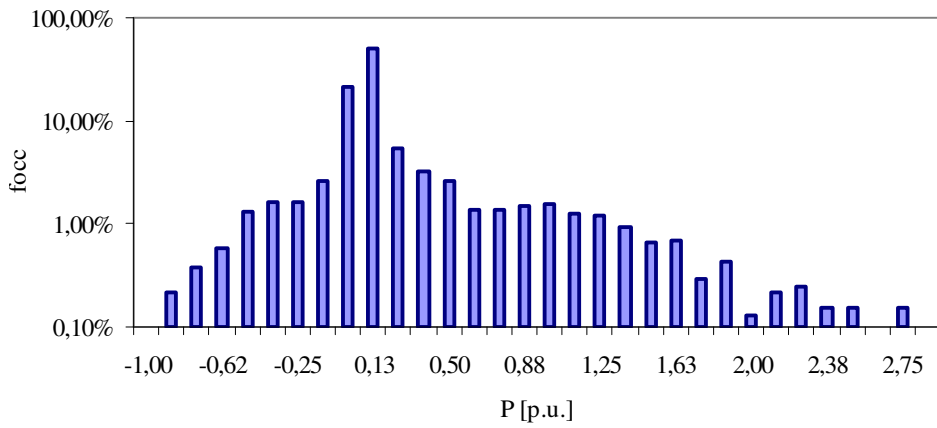


Fig. 11. Power histogram of a KT4 tram moving along the route *Tondi-Ülemiste*

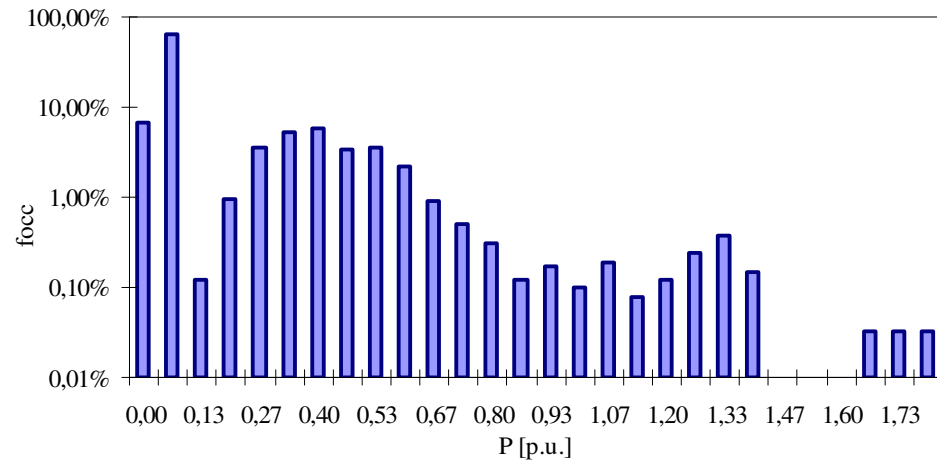


Fig. 12. Power histogram of an electric train moving along the route *Paldiski-Balti Jaam*

As for the traction substations, the loads of single vehicles operating within the service area can level each other, so that the histogram becomes relatively flat (Fig. 13).

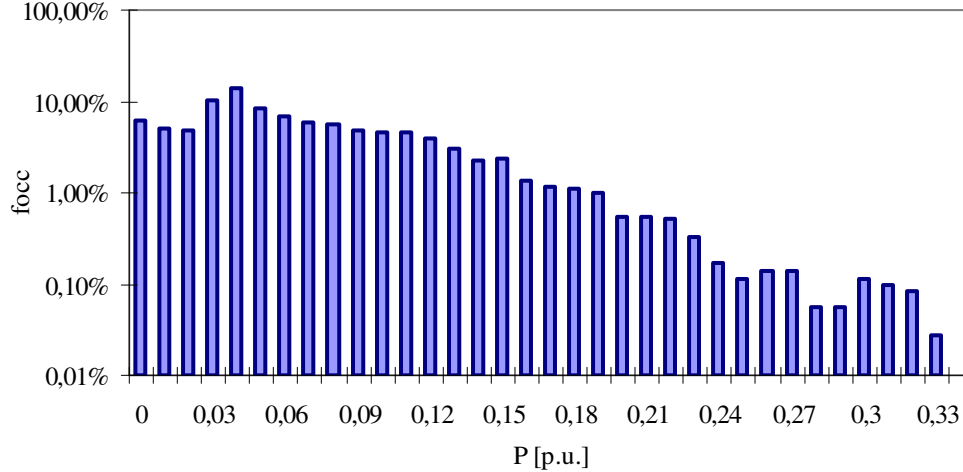


Fig. 13. Power histogram of a tram traction substation No. 4

3.2. Voltage histograms

The vehicles' supply voltage histograms demonstrate the voltage fluctuations in the connection point between the catenary and the pantograph determined by [MÄG07]:

- 1) contact wire cross-section;
- 2) length and cross-section of the DC cables;
- 3) number and position of the vehicles along the catenary;
- 4) load power of vehicles along the catenary;
- 5) load power of vehicles within the traction substation's service area.

The last dependency characterizes a situation where the energy exchange between the decelerating and accelerating vehicles takes place over the substation's busbars.

3.3. A statistical evaluation method for the load power and voltage

The power and voltage sample data can be statistically analyzed by deviations and integral time scales over averaging intervals [PAA05]. The normalized values and standard deviations together with the integral time scales are the main statistical parameters, characterizing a specific averaging interval. The integral time scale

$$T_{\text{int}} = \int_{m=1}^{m_{r=0}} r_m dt = \Delta t \cdot \sum_{m=1}^{m_{r=0}} r_m, \quad (\text{Eq. 10})$$

where Δt is a finite sampling time step and r_m the autocorrelation function, is a value describing the periodicity of the fluctuation, the normalized standard deviation

$$\sigma_{p.u.} = \frac{1}{X_N} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - X_{av})^2} \quad (\text{Eq. 11})$$

is used to estimate the efficiency of leveling.

3.3.1 A storage calculation method based on the low-pass filter analogy

The short-term load fluctuations can be described as a high-frequency noise, which in signal processing is typically suppressed by a discrete low-pass filter. The filter's functionality is similar to the discharging or recharging of an energy storage unit to match variable demand with nearly constant supply. The low-pass filter analogy allows studying the influence of energy storage through different time constants representing the capacity/power ratio [PAA05].

Mathematically, a first-order low-pass filter is described by [NIL96]

$$X_{in} = \tau \cdot \frac{d X_{out}}{dt} + X_{out}, \quad (\text{Eq. 12})$$

where X_{in} is the filter input or non-stabilized value, τ the filtering time constant, X_{out} is the filter output power corresponding to the instantaneous sum of load and storage powers, i.e. the resulting supply power from the catenary. By substituting the differential with a finite time step $\Delta t \rightarrow 0$ in Eq. 12, the dependency in a discrete form for the sequence k becomes

$$X_{in,k} = \tau \cdot \frac{X_{out,k} - X_{out,k-1}}{\Delta t} + X_{out,k} \quad (\text{Eq. 13})$$

Thus, the stabilized output becomes a recurrence function

$$X_{out,k} = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot X_{out,k-1} + \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} \cdot X_{in,k} \quad (\text{Eq. 14})$$

The first right member of the Eq. 14 represents the so-called inertia from the previous filter output (supply power) and the second member is the contribution of the instantaneous input value (load power). The longer the time constant, the less is the catenary power influenced by the fluctuations of the load power. By defining a constant $\alpha = \tau / (\tau + \Delta t)$, the discrete-time implementation of the low-pass filter becomes an exponentially-weighted moving average (EWMA):

$$X_{out,k} = \alpha \cdot X_{out,k-1} + (1 - \alpha) \cdot X_{in,k} \quad (\text{Eq. 15})$$

The filtering quality can be assessed by the changes in the line supply power fluctuation.

3.3.2 ESU parameter calculations for supply load leveling

While leveling the input supply power, the EWMA filter output function becomes

$$P_{ESU,k} = P_{L,k} - P_{S,k}, \quad (\text{Eq. 16})$$

where $P_{L,k}$ is the load power and $P_{S,k}$ the supply power at the sampling time k . By combining Eqs. 15 and 16, the filter (and ESU) power becomes

$$P_{ESU,k} = \alpha \cdot P_{S,k-1} + (1 - \alpha) \cdot P_{L,k} - P_{L,k} = \alpha \cdot (P_{S,k-1} - P_{L,k}) \quad (\text{Eq. 17})$$

By solving Eq. 16 for $P_{L,k-1}$ and by inserting the result into Eq. 17, the instantaneous storage power becomes

$$P_{ESU,k} = \alpha \cdot (P_{ESU,k-1} + P_{L,k-1} - P_{L,k}) = \alpha \cdot (P_{ESU,k-1} + \Delta P_{L,k}) \quad (\text{Eq. 18})$$

At the beginning of the calculation loop, the initial value for $P_{ESU,0} + P_{L,0}$ must be set. The initial value can be found by the iteration of periodic boundary conditions so that the ESU is minimized. The energy drawn from the storage at time step k is described in a discrete form by

$$W_{ESU,k} = -\Delta t \cdot \sum_{m=1}^k P_{ESU,m} \quad (\text{Eq. 19})$$

After that, the energy amount for leveling the fluctuations can be found from

$$W_{ESU} = \max_{k=1..n} W_{ESU,k} - \min_{k=1..n} W_{ESU,k}, \quad (\text{Eq. 20})$$

where n is the total number of data samples. The maximal storage power

$$P_{ESU} = \max_{k=1..n} P_{ESU,k} \quad (\text{Eq. 21})$$

The storage parameters are calculated by help of *MS Excel* with integrated *VBA (Visual Basic for Applications)* macros.

The power integral time scale T_{intP} and standard deviation σ_P are recalculated according to Eqs. 10 and 11 for every defined time constant. Several time constant values can be given simultaneously by a calculation program, which are matched by the storage parameters. The VBA macro calculates the storage parameters for supply load leveling in the following sequence:

1. Reading the sample data set into an array $\{P_{L,i}\}$, where $i = 1..n$.
2. Reading the set m of given time constants into an array $\{\tau_j\}$, where $j = 1..m$.
3. Calculation of the arrays $\{\tau; P_{S,i}; P_{ESU,i}; W_{ESU,i}\}_j$ for every τ_j according to Eqs. 15, 18 and 19.
4. Finding the array $\{\tau_j; W_{ESU,j}; P_{ESU,j}\}$ according to Eqs. 20 and 21.
5. Dividing the sample data set into $k = \lceil n \cdot \Delta t / T_{av} \rceil$, averaging samples according to the averaging interval T_{av} .
6. Calculation of averaging sample arrays $\{P_{av,q}; \sigma_{P,q}; T_{intP,q}\}$ and $\{\tau; P_{av,q}; \sigma_{P,q}; T_{intP,q}\}_j$ according to Eqs. 10, 11, where $q = 1..k$. The first of two arrays is a case without storage, where $\tau = 0$ and $P_S = P_L$.
7. Calculation of the data array $\{\tau_j; P_{av,j}; \sigma_{P,j}; T_{intP,j}\}$, where $P_{av,j}; \sigma_{P,j}; T_{intP,j}$ are the arithmetic means of averaging samples at τ_j .

Together with the numerical parameters described above it is reasonable to draw the graphs $P_S(i) = f(\tau)$, which illustrate the influence of different time constant values on the supply power fluctuations.

3.3.3 Storage parameters for catenary voltage stabilization

By applying the EWMA filter (Eq. 15) to the catenary voltage, its value is expressed by

$$U_{out,k} = \alpha \cdot U_{out,k-1} + (1 - \alpha) \cdot U_{in,k}, \quad (\text{Eq. 22})$$

where $U_{out,k}$ and $U_{in,k}$ are the pantograph voltages in the presence or absence of the ESU at the discretion step k , correspondingly. The stabilizing component causes the supply power to decrease or increase, depending on whether the voltage must be raised or limited

$$P_{ESU,k} = P_{L,k} \cdot \left(\frac{U_{out,k}}{U_{in,k}} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 23})$$

The storage power is determined by the output/input voltage relationship, in the boost mode the catenary acts as a counter-emf, therefore attention must be paid not to feed a short-circuited catenary section.

Similarly to supply power leveling, the initial value U_{out0} must be defined in the beginning ($k = 1$) in order to minimize the storage capacity. Storage powers and capacities can be found from Eqs. 19...21. The VBA macro to calculate the ESU parameters for catenary voltage stabilization is carried out in the following sequence:

1. Read the sample data set into an array $\{U_{in,i}; P_{L,i}\}$, where $i = 1 \dots n$.
2. Read the set m of given time constants into an array $\{\tau_j\}$, where $j = 1 \dots m$.
3. Calculate the arrays $\{\tau; U_{out,i}; P_{ESU,i}; W_{ESU,i}\}_j$ for every τ_j according to Eqs. 22, 23 and 19.
4. Find the array $\{\tau_j; W_{ESU,j}; P_{ESU,j}\}$ according to Eqs. 20 and 21.
5. Divide the sample data set into $k = [n \cdot \Delta t / T_{av}]$, averaging samples after the averaging interval T_{av} .
6. Calculate averaging sample arrays $\{U_{av,q}; \sigma_{u,q}; T_{intU,q}\}$ and $\{\tau; U_{av,q}; \sigma_{U,q}; T_{intU,q}\}_j$ according to Eqs. 10 and 11), where $q = 1 \dots k$. The first of two arrays are a case without storage, where $\tau = 0$ and $U_{out} = U_{in}$.
7. Calculate the data array $\{\tau_j; U_{av,j}; \sigma_{u,j}; T_{intU,j}\}$, where $U_{av,j}; \sigma_{U,j}; T_{intU,j}$ are the arithmetic means of averaging samples at τ_j .

3.3.4 Recycling of braking energy

To make the recycling of regenerative braking energy possible, the capacity must be sufficient to store the amount of energy equal to the change in the vehicle's kinetic energy

$$W_{ESU} = \Delta W_k = \frac{\delta \cdot m_v}{2} \cdot (v_i^2 - v_f^2) \quad (\text{Eq. 24})$$

where m_v is the vehicle's mass, δ the inertia factor taking into account the apparent increase of mass caused by the rotating parts, v_i initial velocity and v_f final velocity. As the regenerative braking is effective only above a minimal speed, $v_f \neq 0$. According to [TAK02], it is possible to store up to 80 % of the vehicle's kinetic energy at initial velocity, therefore Eq. 24 can be simplified to

$$W_{ESU} = \Delta W_k = 0,8 \cdot \frac{\delta \cdot m_v}{2} \cdot v_i^2 \quad (\text{Eq. 25})$$

The storage power for braking energy recycling depends on the braking time t_{br} , which is determined by the average deceleration a_e allowed by the standard [EVS03]. The decrease of vehicle's kinetic energy by 80 % yields a final velocity $v_f = 0.45 \cdot v_i$, therefore the theoretical storage power for regenerative energy absorption is expressed by

$$P_{ESU} = \frac{\Delta W_k}{t_{br}} = \frac{\Delta W_k \cdot a_e}{v_i - v_f} = \frac{\Delta W_k \cdot a_e}{0,45 \cdot v_i} \quad (\text{Eq. 26})$$

3.3.5 Storage power and capacity for catenary-free operation

The storage capacity for enabling autonomous operation of a vehicle depends on the track length and profile. For generalizations, it is possible to calculate the energy consumption per track unit Δs . As the energy consumption of single track sections varies according to the traffic conditions and profile, it is reasonable to use moving average values instead of arithmetic mean over the whole track. The moving averages give an array of

$$W_{ESU,i} = \max_{s=s_i \dots s_i + \Delta s} W_{L,s} - \min_{s=s_i \dots s_i + \Delta s} W_{L,s}, \quad (\text{Eq. 27})$$

$$P_{ESU,i} = \max_{s=s_i \dots s_i + \Delta s} P_{L,s},$$

where $W_{L,s}$ and $P_{L,s}$ are consumed energy and load power in the track position s and s_i the distance covered so far. If the vehicle is supposed to operate autonomously over a distance of Δs along the whole route, the capacity and power are

$$W_{ESU} = \max_{i=1 \dots m} W_{ESU,i}$$

$$P_{ESU} = \max_{i=1 \dots m} P_{ESU,i} \quad (\text{Eq. 28})$$

where m is the number of calculated moving averages.

3.4. Storage calculation examples

3.4.1 Supply load leveling

A trolleybus moving on the route *Mustamäe-Kaubamaja-Mustamäe* (Table 1, Fig. 14) needs less storage capacity for supply load leveling than the tram on the route *Tondi-Ülemiste* (Table 2, Fig. 15) because the power peaks have smaller duration (P_{av} : average power, P_{max} : peak power).

Table 1. Dependency of the supply power statistics on the storage time constant of a trolleybus along the route *Mustamäe-Kaubamaja-Mustamäe*

τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,32	3,38	0,45	1,54	-	-
5	0,32	1,31	0,23	5,14	234	654
10	0,32	0,98	0,17	6,35	264	972
30	0,32	0,69	0,08	7,91	293	2060
60	0,32	0,60	0,05	8,00	298	3599

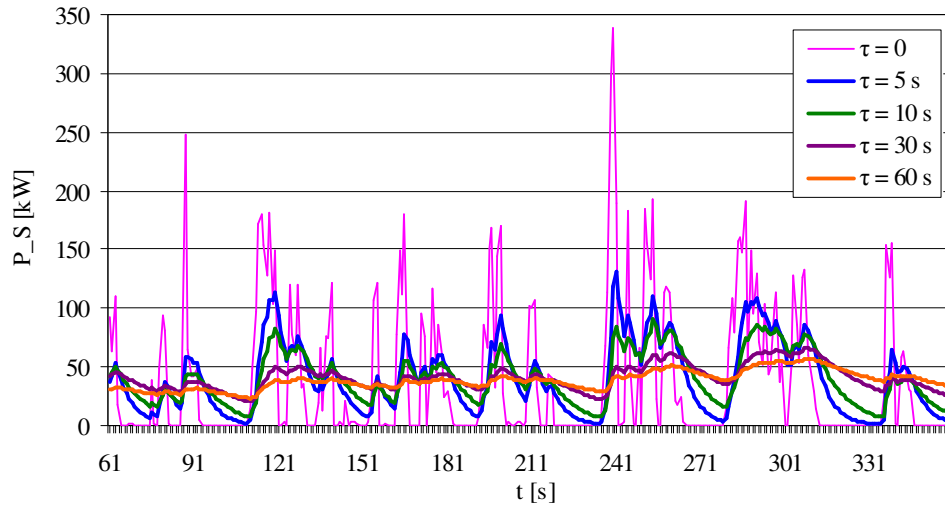


Fig. 14. Supply power dependency on the storage time constant of a trolleybus along the route *Mustamäe-Kaubamaja-Mustamäe*

Table 2. Dependency of the supply power statistics on the storage time constant of a tram along the route *Tondi-Ülemiste*

τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{in} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,13	2,67	0,33	3,40	-	-
5	0,13	1,36	0,21	6,69	242	1540
10	0,13	1,14	0,16	7,88	298	2369
30	0,13	0,67	0,08	9,37	365	3826
60	0,13	0,47	0,04	9,77	386	5072

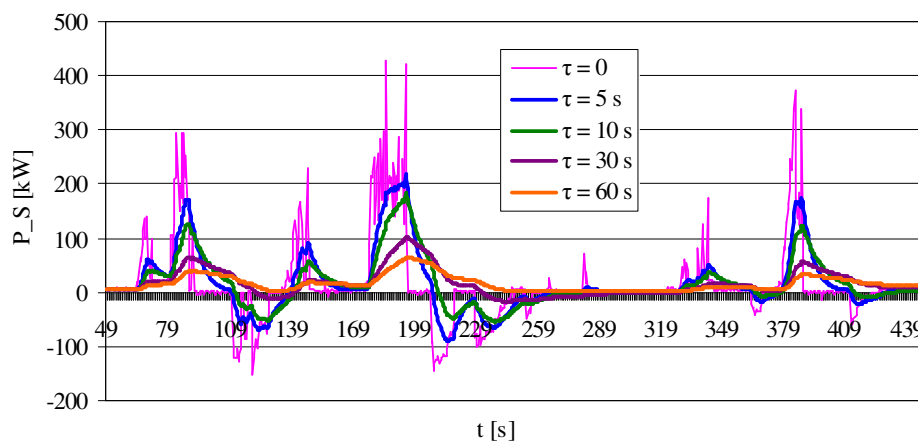


Fig. 15. Supply power dependency on the storage time constant of a tram along the route *Tondi-Ülemiste*

While calculating the new load diagrams for the traction substation (TS) No. 4 servicing the light rail traffic (Table 3, Fig. 16), it becomes evident that the

vehicles having different instantaneous loads complicate the load leveling; however, the proper ESU dimensioning allows to keep the substation's instantaneous load within an acceptable window.

Table 3. Dependency of the supply power statistics on the storage time constant of the TS No. 4

τ [s]	P_{av} [p.u.]	P_{max} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	0,07	0,29	0,05	3,59	-	-
5	0,07	0,20	0,03	6,18	299	2365
10	0,07	0,17	0,02	7,28	394	3811
30	0,07	0,12	0,01	8,49	490	5941
60	0,07	0,10	0,01	8,77	516	6921

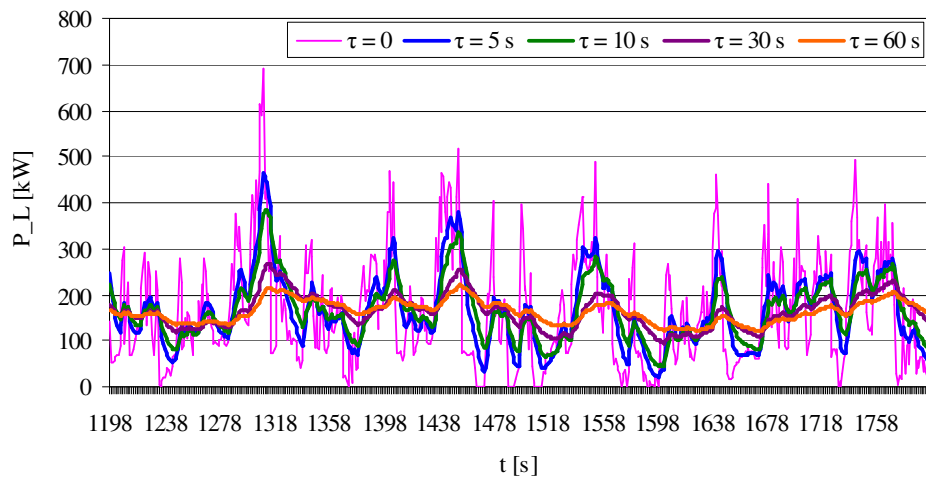


Fig. 16. Supply power dependency on the storage time constant of TS No 4

3.4.2 Catenary voltage stabilization

The necessary storage capacity and power for a tram's pantograph voltage stabilization are smaller than by the supply power leveling (Table 4, Fig. 17). As for the observed trolleybus, the transient voltages pose a problem (Table 5, Fig. 18), their suppression characterizes the ESU's behavior as a low-pass filter.

Table 4. Dependency of the supply voltage statistics on the storage time constant of a tram along the route *Tondi-Ülemiste*

τ [s]	U_{av} [p.u.]	U_{max} [p.u.]	U_{min} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	1,04	1,21	0,67	0,05	1,57	-	-
5	1,04	1,15	0,88	0,02	6,24	55,5	1023
10	1,04	1,14	0,92	0,02	7,28	60,3	1354
30	1,04	1,13	0,97	0,01	9,33	62,5	1695
60	1,04	1,12	0,99	0,01	10,1	66,1	1776

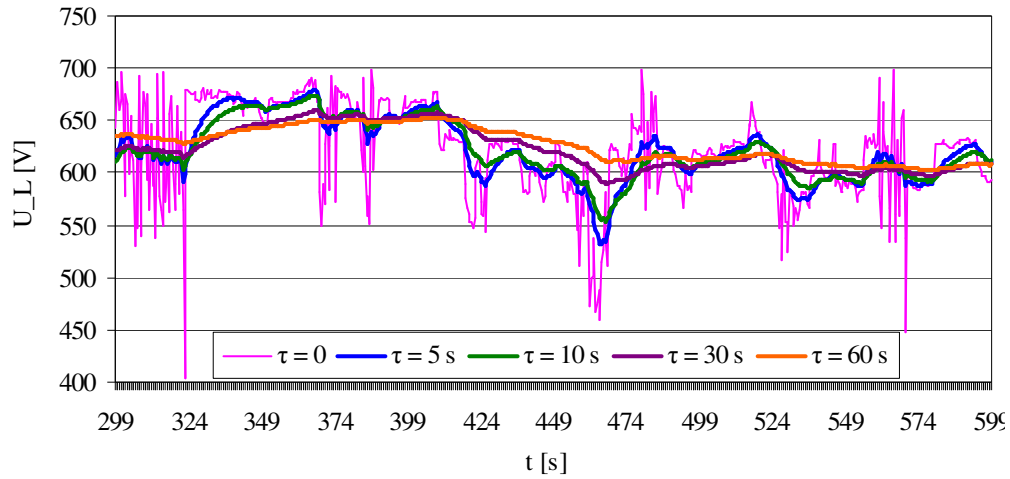


Fig. 17. Supply voltage dependency on the storage time constant of a tram along the route *Tondi-Ülemiste*

Table 5. Dependency of the supply voltage statistics on the storage time constant of a trolleybus along the route *Mustamäe-Kaubamaja-Mustamäe*

τ [s]	U_{av} [p.u.]	U_{max} [p.u.]	U_{min} [p.u.]	σ [p.u.]	T_{int} [s]	P_{ESU} [kW]	W_{ESU} [kJ]
0	1,07	2,08	0,63	0,18	0,36	-	-
5	1,07	1,39	0,83	0,06	4,88	119	3041
10	1,07	1,28	0,88	0,05	6,20	139	3904
30	1,07	1,18	0,95	0,02	8,00	170	4806
60	1,07	1,15	0,98	0,01	9,03	179	4971

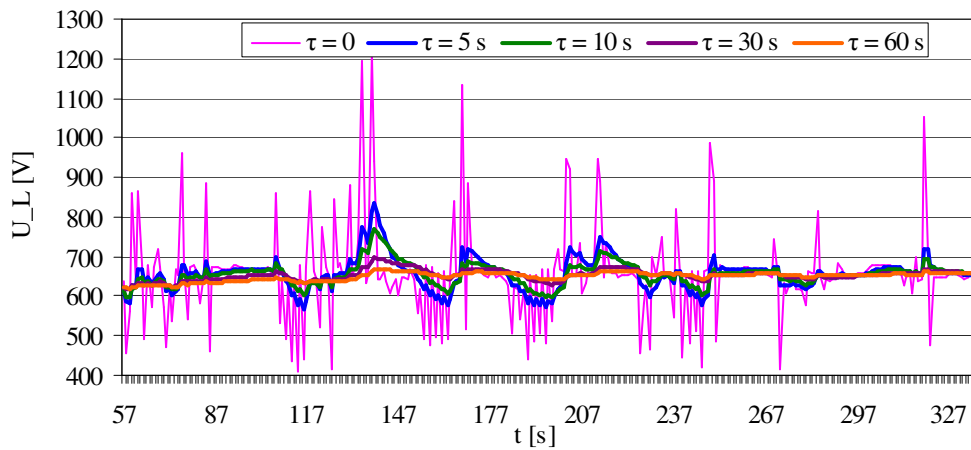


Fig. 18. Supply voltage dependency on the storage time constant of a trolleybus along the route *Mustamäe-Kaubamaja-Mustamäe*

3.4.3 Braking energy recycling

The results (Table 6) show that storing braking energy during a short time requires high recharging power, which is a case concerning rail vehicles. Thus, the regenerative energy storage is feasible for relatively long deceleration times only.

Table 6. Theoretical braking energy storage capacities and powers

Objekt	v_i [km/h]	a_e [m/s ²]	W_{ESU} [kJ]	P_{ESU} [kW]
KT4 tramcar	49,3	1,2	2608	457
14Tr trolleybus	65,0	1,2	2394	318

Similar results for a tramcar may be obtained whilst analyzing the cumulative energy consumption W_{cum} of a vehicle with regenerative braking ability (Fig. 19).

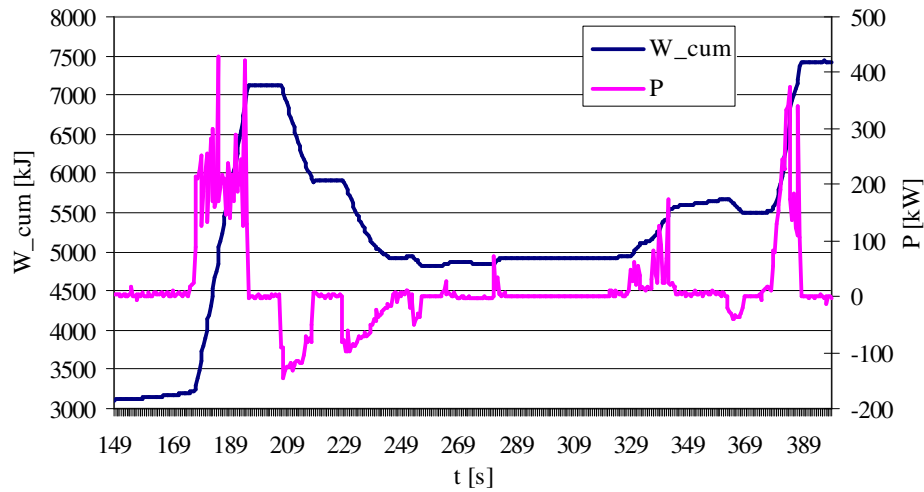


Fig. 19. Finding the regeneration storage parameters from the cumulative energy

In the given example, 2197 kJ were regenerated, which must correspond to the ESU capacity. The recharging power reached up to 151 kW. Such graphs may be drawn for other vehicles as well. As the global practice shows that approximately 1/3 of the acceleration power can be supplied by the ESU [WER07], equal to the braking energy absorption power. So the investigation results match the assumptions made by previous researchers [JOL02].

3.4.4 Catenary-free operation

The capacities and powers for covering a distance Δs calculated according to Eq. 27 are displayed in Table 7. With braking energy recycling, the necessary storage capacity decreases (Fig. 20), as the residual energy can even grow during an autonomous trip. The same figure shows that the minimal capacities to cover catenary-free section Δs are located in the city center.

Table 7. Capacities for covering a Δs distance

Vehicle	Δs [km]	$W_{ESU,max}$ [kJ]	$W_{ESU,min}$ [kJ]	$W_{ESU,av}$ [kJ]	P_{ESU} [kW]
KT4 tramcar	1,0	9908	1195	5459	427
14Tr trolleybus	1,0	8881	3273	5647	338

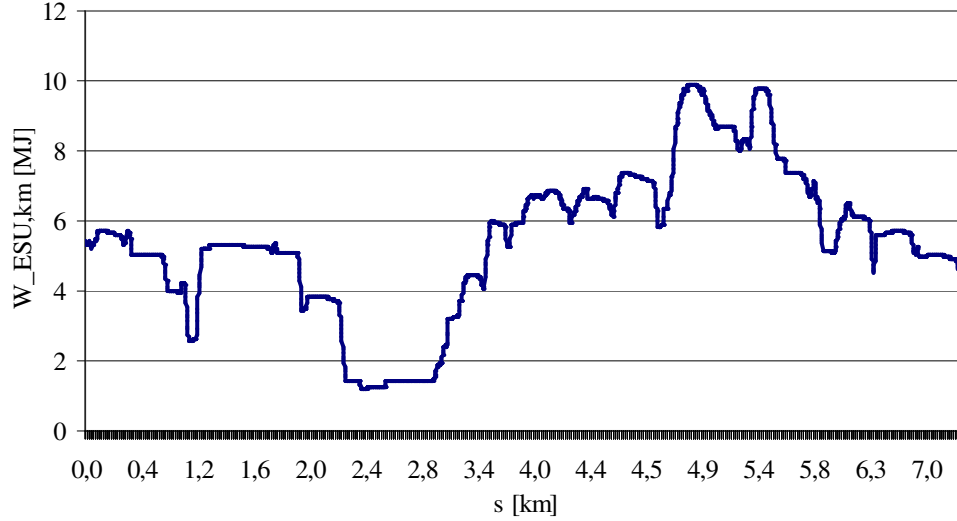


Fig. 20. Required storage capacity for the 1 km catenary-free operation of a KT4 tramcar along the route *Tondi-Ülemiste*

3.5. Ultracapacitive storage dimensioning

For dimensioning, the requirements of the applicable ultracapacitor battery must be defined firstly. The selected battery must be capable of:

- 1) storing an energy amount W_{ESU} to fulfill the preset task,
- 2) withstanding loads up to P_{ESU} ,
- 3) withstanding terminal voltages up to $U_{ESU,N}$.

The total capacitance C_{Σ} of the ultracapacitor battery can be derived from the necessary capacitance, rated voltage $U_{ESU,N}$ and the SOC window $SOC_{max} \dots SOC_{min}$. If a buck-boost converter is used as a power interface, then $SOC_{max} = 1$, $SOC_{min} = 0.5$, and the capacitance is expressed by

$$C_{\Sigma} = \frac{2 \cdot W_{ESU}}{0,75 \cdot U_{ESU,N}^2} \quad (\text{Eq. 29})$$

Next, the ultracapacitor battery dimensions must be found, i.e. the number of capacitors in series connections n_s and the number of parallel strings n_p . The number of series capacitors can be calculated by dividing the battery terminal voltage $U_{ESU,N}$ with the ultracapacitor cell voltage $U_{UC,N}$ and rounding the result to the ceiling value

$$n_s = \left\lceil \frac{U_{ESU,N}}{U_{UC,N}} \right\rceil \quad (\text{Eq. 30})$$

Then, the capacitance of a single ultracapacitor cell can be calculated.

$$C = C_{\Sigma} \cdot \frac{n_s}{n_p} \quad (\text{Eq. 31})$$

The total number of ultracapacitors in the battery is expressed by

$$n_{UC} = n_s \cdot n_p \quad (\text{Eq. 32})$$

The number of parallel strings n_p , can be found iteratively, i.e. by comparing the calculated C_{UC} value with the values in the manufacturers' lists. The rated terminal voltage of the ultracapacitor battery must be selected below the most probable catenary voltage fluctuation window to avoid uncontrollable energy flows through the freewheeling diode of the buck-boost power interface. In the following example, $U_{ESU,N} = 480 \text{ V}$.

3.6. Pay-off time calculation examples

3.6.1 Pay-off time calculation of a tram's onboard storage unit

Let us calculate a braking energy storage unit's price for a tram moving on the route *Tondi-Ülemiste-Tondi*. From Eq. 29...Eq. 32, the amounts of 3000 F ultracapacitors (type BCAP3000 P270 from the Maxwell Technologies) are $n_s = 178$, $n_p = 2$, $n_{UC} = 356$. As the traction converter of the observed trams KT4 already comprises a half-bridge for interfacing the perspective energy storage, only the cost for the additional hardware in the form of ultracapacitors and their accessories must be taken into account. The market price of a 3000 F ultracapacitor is 660 EEK, also active clamping integration kits for 6 series capacitors with a unit price of 642 EEK are necessary. The total price for an ESU enabling the full utilization of regenerative braking energy would be $356 \cdot 660 + 60 \cdot 642 = 273,480$ EEK.

The cumulative regeneration of a tram moving on the observed route was 5.46 kWh (Fig. 21). As the tram follows the same route five times a day and 350 times a year, the yearly electricity saving would be $5.46 \cdot 5 \cdot 350 = 9,555$ kWh. At the tariff of 1.30 EEK/kWh the yearly savings in currency would be $9555 \cdot 1.30 = 12421.50$ EEK. *The pay-off time at current prices for energy and ultracapacitors would be 22 years.*

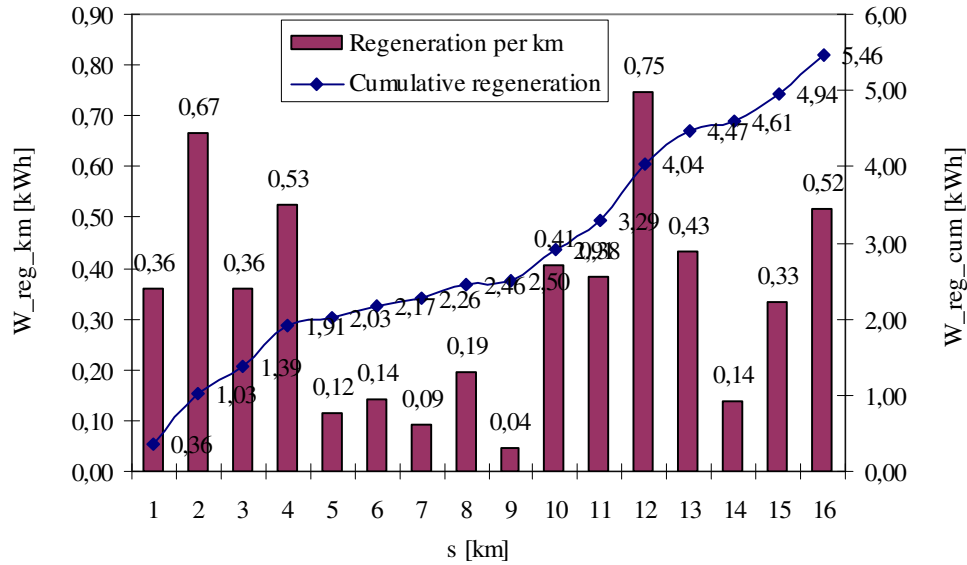


Fig. 21. Energy regenerated by a tram moving on the route Tondi-Ülemiste

3.6.2 Pay-off time calculation of a stationary substation storage unit

A perspective storage unit composed of 3000 F ultracapacitors for the traction substation No. 4 ($\tau = 10$ s, $n_s = 178$, $n_p = 3$, $n_{UC} = 534$), meant primarily for the medium voltage load leveling, can be used for regenerative energy recycling as well. The observed substation feeds the catenary sections between stops *Paberi* and *Majaka põik* in both directions on the kilometers 5...7 and 10...12 (Fig. 21), passed by the trams moving along the route *Tondi-Ülemiste-Tondi*. The energy regenerated by a vehicle within these catenary sections sums up to 1.89 kWh. According to the timetable, 140 trams pass daily through the service area of the observed substation. With similar dynamics and regeneration ability of the vehicles, the yearly energy savings would be $1.89 \cdot 140 \cdot 365 = 96579$ kWh, expressed in currency $96579 \cdot 1.30 = 125,552.70$ EEK. A 534-cell ultracapacitor battery would cost $534 \cdot 660 + 90 \cdot 642 = 410220$ EEK. Assuming the interfaces' price be equal to the ultracapacitor battery, *the pay-off time would be 6.5 years*. A further shortening of the pay-off time may be expected from smaller per-ampere monthly payments, as the peak power decreases by 1.7 times (Table 3).

Without taking into account other circumstances (energy transfer losses in the catenary, reduced wear of the contact wire), *the proposed calculation methodology shows, that the most economic installation place for an energy storage unit would be inside a traction substation where its utilization factor and contribution to energy savings are maximal.*

4. Application of ultracapacitors in extra-low-voltage circuits of a tramcar

4.1. Description of extra-low-voltage circuits

Low-voltage circuits of a tramcar during its normal operation are normally supplied from the auxiliary power unit (APS). In the normal operation, an APS converter must ensure trouble-free operation of all the subsystems connected to its outputs. But in the case of crossing of catenary section disconnectors, when the output voltage of the APS converter drops to zero, all the secondary low-voltage systems are supplied from the tram back-up battery. After the disconnector, the battery is refilled from the APS. It means that the onboard battery needs to have sufficient energy density (to provide constant power to such loads like lighting, announcement systems, etc.) and high power density (for peak current demands like emergency braking). Namely, the last criteria have raised many questions in several European tram- or LRV-companies. Based on massive investigations, it has been stated that namely the back-up battery is the weakest part on old and even on new trams. For instance, in winter with low outside temperatures, the productivity of the accumulator battery dramatically decreases because of increased internal resistance, which, in turn, depends on the electrolyte's density. Further, with very low temperatures (-35 °C and lower), productivity is so low that the battery even can not be charged. Finally, it means that sometimes during section disconnectors and in cases of dangerous traffic situations, a tramcar driver is not able to stop the tram with the emergency (electromagnetic) brake because of the discharged back-up battery. Thus, rugged railway RAMS requirements are violated and it may cost sufficient penalties to the tramcar company

4.1.1 Main back-up battery

The existing back-up battery on a KT4 type tramcar is composed of 17 or 18 NiCd cells, 1.2 V each (Table 8). During the time of commissioning these battery types were the only option with sufficient energy and power density.

Table 8. Specifications of the main back-up battery of the tramcar ČKD KT4

Specification	Cell	Battery	
Type designation	NK-125	17 cells	18 cells
Nominal voltage, V	1.2	20.4	21.6
Minimal voltage, V	1.0	17	18
Float charging voltage, V	1.4	24	25
Capacity, Ah	125		
Internal resistance at full charge, mΩ	0.32	5.44	5.76
Temperature range, °C	-40...+40		
Rated service life	10 years		

Similar batteries with different brandings are also used in older trolleybuses 14Tr and 15Tr produced by the Škoda Company. It must be mentioned that with few exceptions, the existing batteries were installed at Soviet time and have therefore

exhausted their rated capabilities, expressed by increased internal resistance and decreased capacity. Regarding to recently procured trolleybuses, mostly modern gel-type lead-acid batteries with overdimensioned capacity are used due to less specific power in contrast to NiCd. However, the gel-type batteries properly chosen show similar service time and energetic performance, whereas the cost is approximately three times lower and environmental issues less harmful.

4.1.2 Combined ultracapacitor-electrochemical battery

To improve the specific power of the onboard back-up supply, ultracapacitors in the secondary low-voltage power supply bus of the tramcar are proposed to be integrated with the battery as a long-time energy storage device. For the reliability and response time considerations, no special DC/DC converters (chargers) are implemented. A similar solution may be found in several papers dealing with internal combustion engine's starting assistance [BOI02].

4.2. Analysis of load currents of the extra-low-voltage circuits

During the operation of a tramcar in city traffic conditions, different low-voltage loads may be switched on and off very randomly. To simplify further discussions, the average operational cycle of a tram can be divided into three most demanding operation modes. Each of those is characterized by its averaged current consumption:

- 1) normal coasting mode (considers the normal rolling of a tram): heating is switched off, brakes are released, external and internal lighting is switched on;
- 2) parking braking mode (braking on stops, mechanical pad brakes are applied, other systems like in 1);
- 3) emergency braking mode (full braking effort, electromagnetic brakes are applied; pad brakes are applied, other systems like in 1).

Visual interpretations of these modes are presented in Fig. 22.

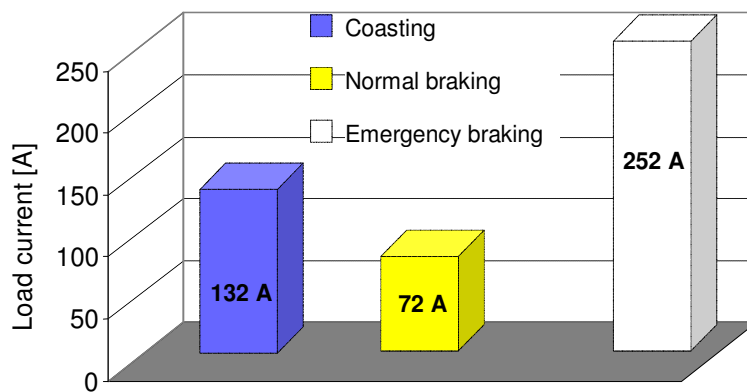


Fig. 22. Average load current of the LVPS in different operation modes

4.3. Battery-ultracapacitor interconnections

There are three main possibilities of passive battery-ultracapacitor interconnections. The simplest option with minimal rewiring is to connect the ultracapacitor module $C1$ just parallel to the main battery $G1$ and the peak load(s) $E1$ (Fig. 23). In this case, the ultracapacitor charging current can be limited by means of a charging resistor R_{ch} , which is bypassed by a contactor $KM1$ during discharge. If wiring and battery's internal resistances are sufficiently high, R_{ch} can be omitted. While discharging its energy to the peak load, e.g. electromagnetic brake, the currents between two back-up sources are divided on the basis of internal resistances and the remaining state of charge. This solution is feasible while supplying multiple peak loads.

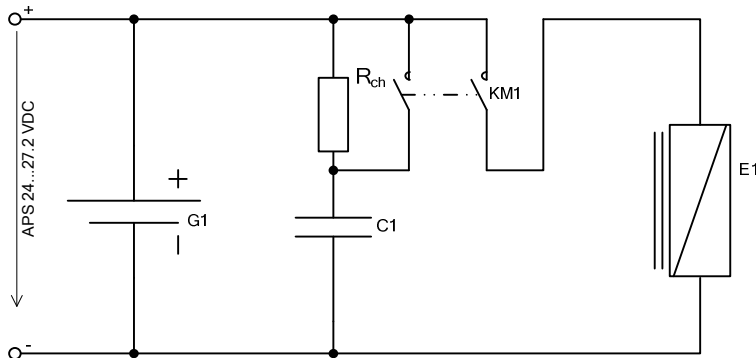


Fig. 23. Passive parallel connection diagram [SHA08]

If peak loads, such as electromagnetic brakes, have individual supercapacitor-booster, the primary supply from the APU and main back-up battery might be cut off during their activation, as depicted in Fig. 24. Like in the previous figure, the charging resistor can be omitted under certain conditions.

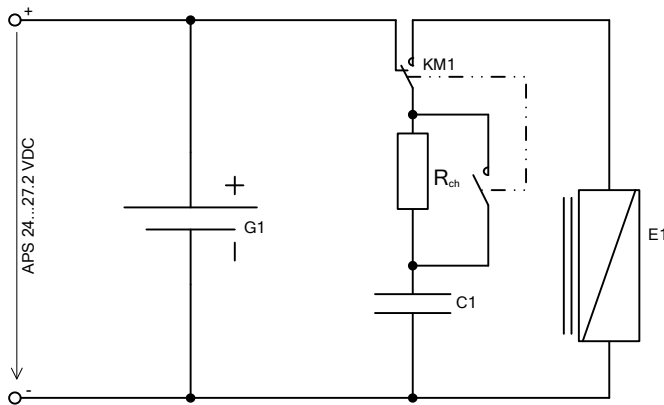


Fig. 24. Diagram with primary supply cutoff [BOI02]

Another possibility is to apply a switchover diagram, where the load $E1$ is normally connected in series with the capacitor $C1$ (Fig. 25) and the charging

current is additionally limited by the load's resistance. After energizing the switchover contact *KM1*, the discharging current flows through the brake's electromagnet magnetizing it. In this case, other supply elements are excluded.

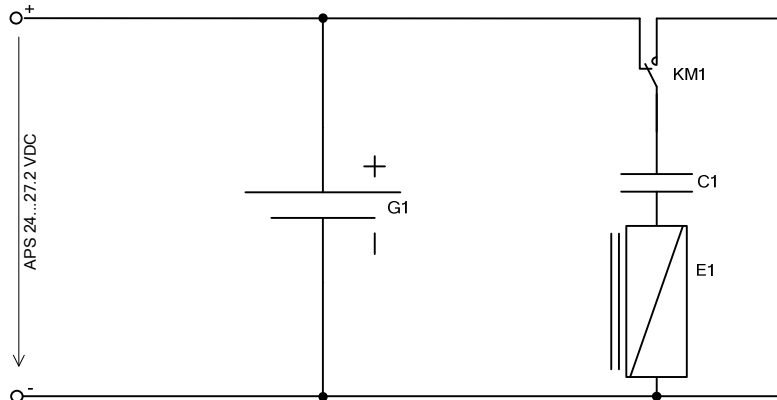


Fig. 25. Peak load supply with series-parallel switchover [REN98]

4.4. A case study

The first experiment carried out in the Tallinn Tram and Trolleybus Company was operating the rail brake solely on onboard NiCd batteries. Thus, real values needed for further simulation were obtained (Fig. 26).

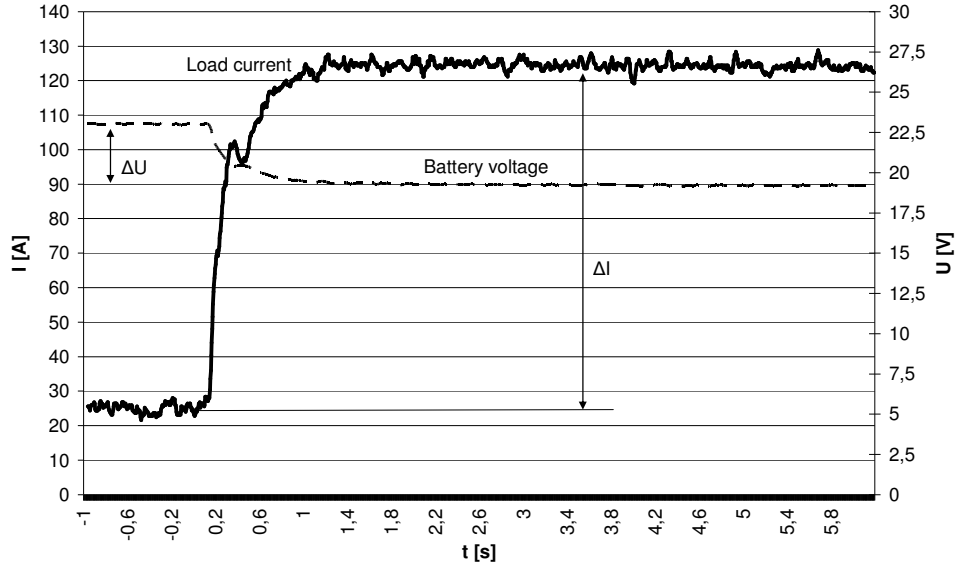


Fig. 26. Battery current and voltage profiles during emergency braking

The internal resistance of a single cell or battery string R_{bat} was calculated by

$$R_{bat} = \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad (\text{Eq. 33})$$

where ΔU is the voltage change across battery terminals caused by the load change and ΔI is the change in the load current. As seen from Fig. 26, $\Delta U = 3.8$ V and $\Delta I = 99$ A, so $R_{bat} = 38.3$ m Ω . This value is much higher than that shown in Table 8, which can only be explained by the ageing of a battery.

During the second experiment, an existing ultracapacitor battery (Table 9) was connected in parallel with the NiCd cells. The results are displayed in Fig. 27. The voltage drop was reduced to $\Delta U = 3.4$ V and the output current to $\Delta I = 112$ A.

Table 9. Ultracapacitors used in the experiment

Specification	Module	Battery
Type designation	PCM14014	
Rated voltage [V]	14	28
Capacitance [F]	150	75
Internal series resistance [m Ω]	12.2	14.4
Usable energy [Wh]	2.82	5.64

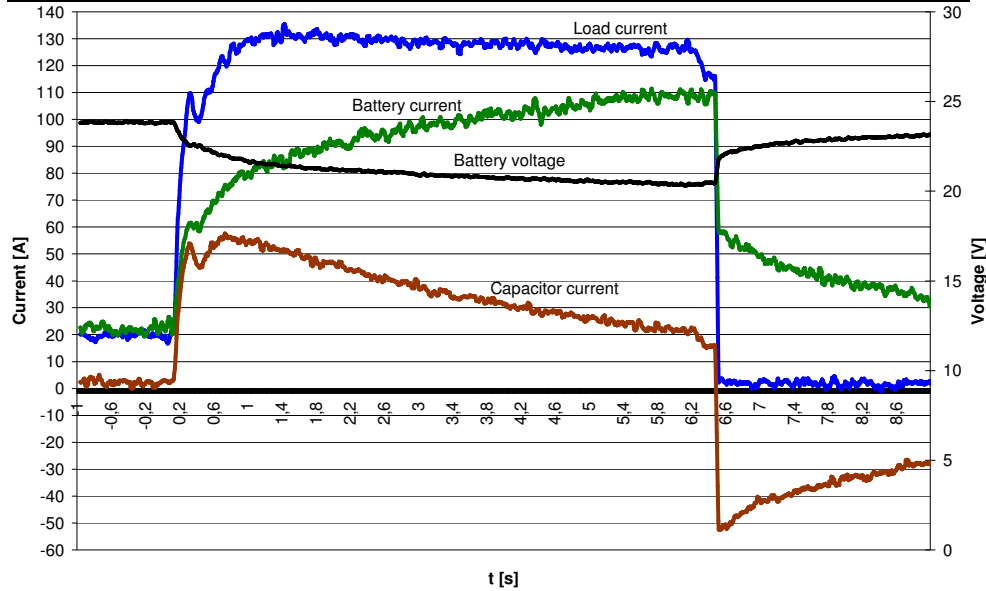


Fig. 27. Experimental results with PCM14014 ultracapacitors

To simplify the calculations, the electromagnetic brake can be substituted with a RL branch with resistance R_{br} and inductance L_{br}

$$R_{br} = \frac{U_2}{I_2} - R_{bat}, \quad (\text{Eq. 34})$$

where U_2 and I_2 are battery terminal voltages and current under peak load, respectively. After assigning parameter values, $R_{br}=120$ m Ω . This value includes also additional wiring resistance. The brake inductance L_{br} can be calculated from

$$L_{br} = \tau \cdot R_{br} \quad (\text{Eq. 35})$$

where $\tau = 0.4$ s is the time constant estimated from Fig. 26.

4.4.1 Sizing of ultracapacitor module for combined energy storage

The emergency braking is a process with rapidly changing dynamics with a duration ≤ 6 s, limited by the safe deceleration ramp. In an ideal case, the design of the onboard combined energy storage system must be coordinated so that peak loads can be supplied by the storage without reducing the operating voltage below the accepted minimum. Energy W_{br} consumed during braking is expressed by

$$W_{br} = U_{aux,N} \cdot I_{br} \cdot t_{br}, \quad (\text{Eq. 36})$$

where $U_{aux,N}$ is the rated auxiliary voltage, I_{br} ideal braking current value and t_{br} duration of a braking event. Accordingly, the total energy consumed during a 6 s braking process by the track brake $W_{br} = 28.8$ kJ. The capacitance required from an ultracapacitor battery to compensate a random peak load could be estimated by

$$C = \frac{2 \cdot W_{br}}{U_{aux,N}^2 - U_{aux,min}^2}, \quad (\text{Eq. 37})$$

where U_{min} is the minimal allowable short-term undervoltage. As stated by standards [EVS07], $U_{min} = 17$ V, so $C = 200$ F.

4.4.2 Selection of the ultracapacitor modules

From the variety of vendors and different ultracapacitor types commercially available, the BMOD0500 P016 ultracapacitor modules from Maxwell Technologies, with technical specifications presented in Table 10, were selected for the current application. To match the operating voltage and necessary capacitance, two identical modules should be connected in series. With the total weight of 11.5 kg and overall dimensions of 416 mm x 134 mm x 157 mm (LxWxH), the installed ultracapacitor module has no serious impact on the total volume occupied by the combined onboard storage system.

Table 10. Specifications of BMOD0500 P016 ultracapacitor modules

Specification	Module	Battery
Rated voltage, V	16.2	32.4
Capacitance, F	500	250
Internal series resistance, mΩ	2.4	4.8
Energy density, Wh/kg	3.17	
Power density, W/kg	6700	

4.4.3 Simulation results

To verify the results of calculations, software models were developed in the *Simulink* environment. The models for constant parallel supply (Fig. 23) and series-parallel changeover (Fig. 25) are shown in Fig. 28 and Fig. 29, respectively.

Simplifications and substitutions were made as follows:

1. The NiCd battery and RL equivalent circuits of the electromagnetic brake were modeled. The ultracapacitor set is represented by a series connection of an ideal capacitance and a resistor based on the values presented in Table 5.3.
2. The APU with wiring to the loads and the battery was substituted by an ideal DC source of 26.4 V and a series resistance, resulting in a battery's terminal

voltage of 24 V under normal movement mode with total consumption current defined in Fig. 22.

3. Normal loads while running and braking are represented by equivalent resistors.

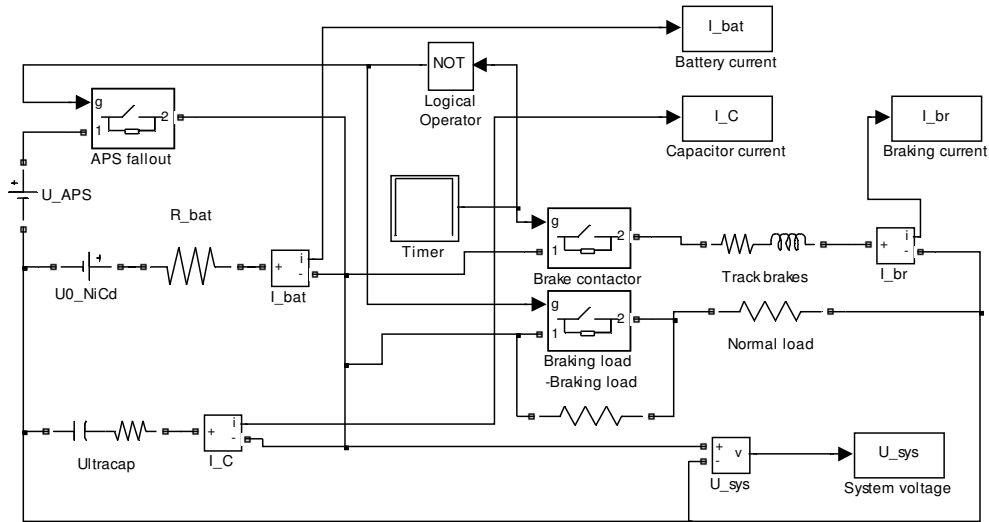


Fig. 28. Parallel ultracapacitor model

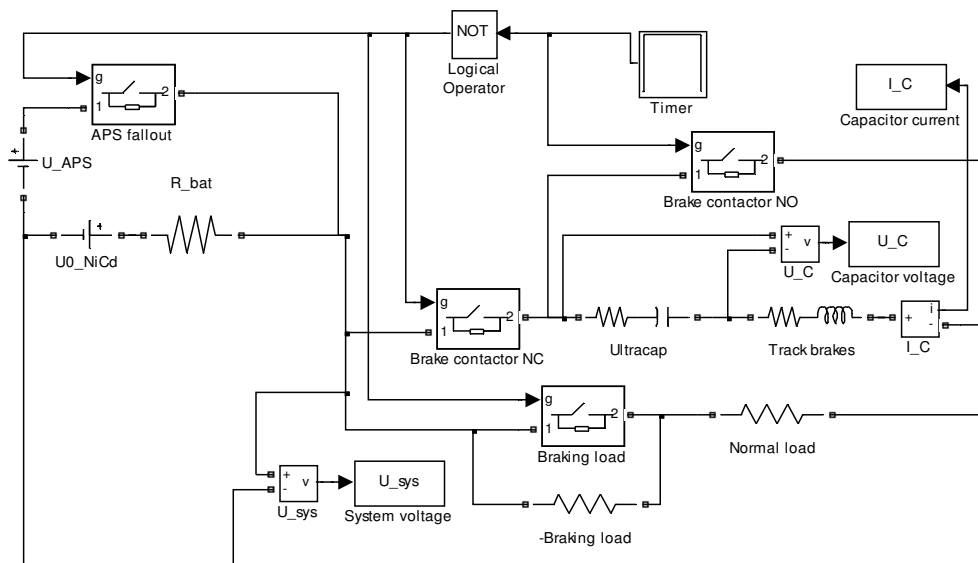


Fig. 29. Series-parallel switchover model

With an additional parallel ultracapacitor, low voltage system performance increases remarkably (Fig. 30a). In the beginning, the braking current reaches 180 A and starts slightly to fall. Both storage devices are involved in energy exchange with decreasing contribution of the ultracapacitors while discharging and

increasing the burden to the main battery. During 6 s emergency braking, the system voltage falls down to 20.5 V. After being released, the ultracapacitor starts to recharge from the main battery and/or the APS. This solution is most feasible when battery and ultracapacitor have at least tenfold difference in internal resistances.

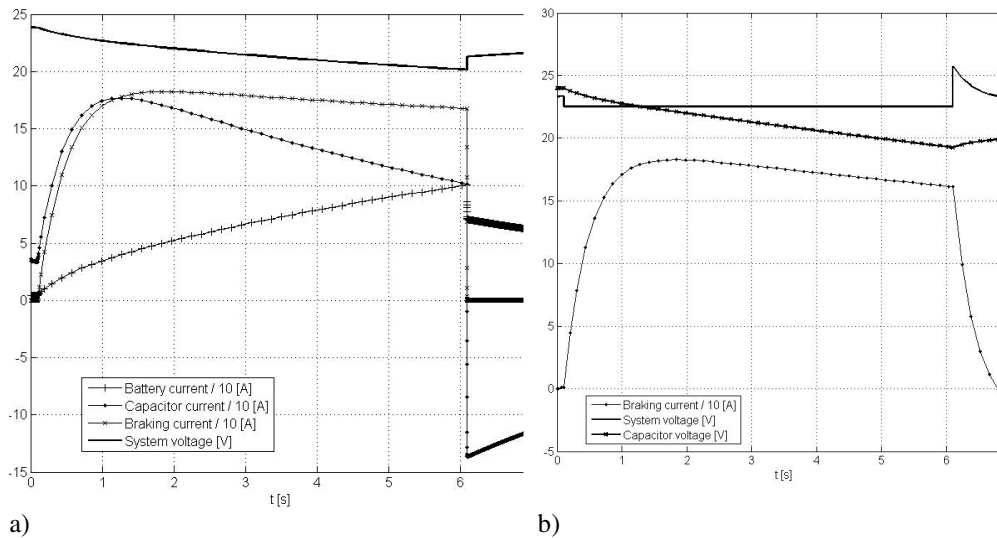


Fig. 30. Simulated emergency braking current and battery voltages with combined parallel storage (a) and with series-parallel switchover (b)

The electromagnetic brake and ultracapacitor are decoupled from the rest of auxiliaries if a series-parallel switchover schema is applied. The system voltage shows only a minor drop caused by other loads of more constant character (Fig. 30b). The capacitor starts to discharge its stored energy into the peak load with decreasing terminal voltage. Braking current curve follows the voltage pattern with gradual mitigation; however, near the saturation zone the induced magnetic flux is less dependent on the current.

4.5. Benefits of ultracapacitors in the extra-low-voltage circuits

The simulations conducted showed that the ultracapacitor module selection was correct while the braking current reached its maximum value and system voltage drop was found more limited than before. The performance of emergency track brakes as well as other peak loads in a tramcar can be sufficiently improved. Ultracapacitor use in the low-voltage power supply bus (LVPS) of tramcars offers the following advantages:

- 1) improvement of efficiency and reliability of the emergency braking system especially at cold temperatures;
- 2) improvement of reliability of extra-low-voltage circuits, as the ultracapacitor battery is to some extent capable of suppressing the high-frequency noise;
- 3) possibility of reduced main back-up battery size thanks to peak shaving;
- 4) prolonged main back-up battery life thanks to less intensive load cycles;

5) reduced maximum output power of the APS.

To minimize voltage drops and increase efficiency of the proposed solution, the ultracapacitors should be preferably placed as close to the peak load as possible.

The conclusive modernization proposal for the extra-low-voltage circuits of a KT4 tramcar is shown in Fig. 31, where the energy flows at the presence and absence of APS supply voltage ($PB = 1$) and ($PB = 0$) respectively are displayed. This is an amendment for a previous proposal [VIN05], where the peak loads are supplied by the ultracapacitors UC also if the APS primary voltage is present.

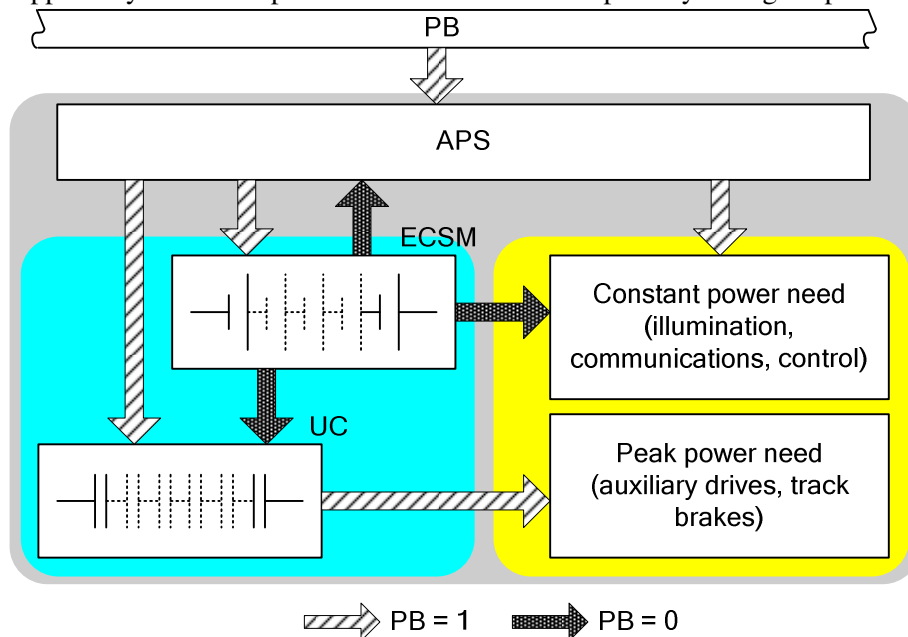


Fig. 31. Proposed extra-low voltage installation of a KT4 tramcar

5. Technology transfer possibilities

5.1. Energy savings in diesel-electric drives

The diesel-electric shunting locomotives (Fig. 32) may be considered as electric vehicles with the onboard power plant. As a rule, they are used for pulling a single car or a group of cars in rail yards, characterized by the cyclic mode. This means that the locomotive uses its full power only temporarily while pulling, the rest of the time it works at underload or idles. The working cycle resembles an urban vehicle (Fig. 33) [AKL07] [DES04]. These working conditions make the energy production of the diesel generator unit (DGU) ineffective, while at the steady-state partial loads their efficiency is much lower.

While starting a major modernization of the locomotive power plant, first the requirements must be defined [KOE05]:

1. The diesel engine must operate in the region of optimal energy production, which usually varies between 50 %...100 % P_n .

2. The DGU power should match the average load during shunting operations.
3. During dynamic processes, the DGU must be assisted by a complementary short-time power source.
4. The user interface should remain possibly unaltered to avoid costly retraining and certifying.

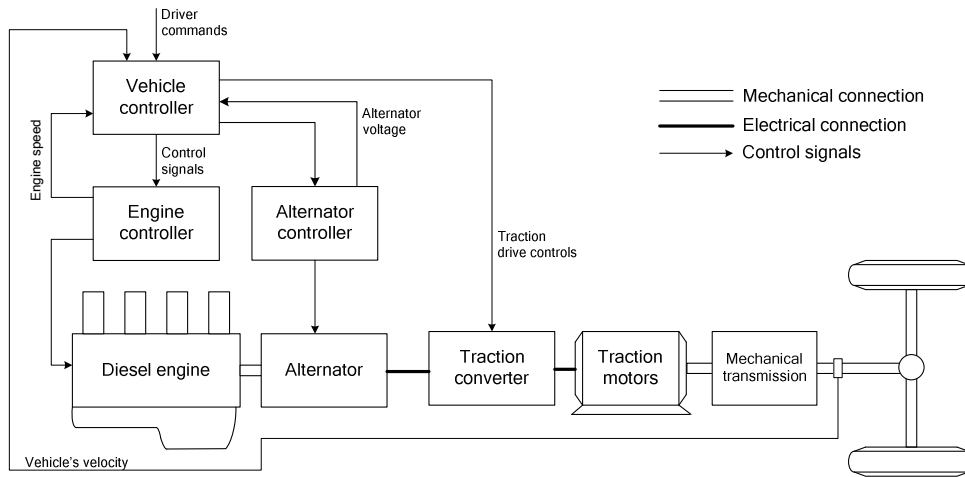


Fig. 32. Generalized diagram of a diesel-electric traction drive

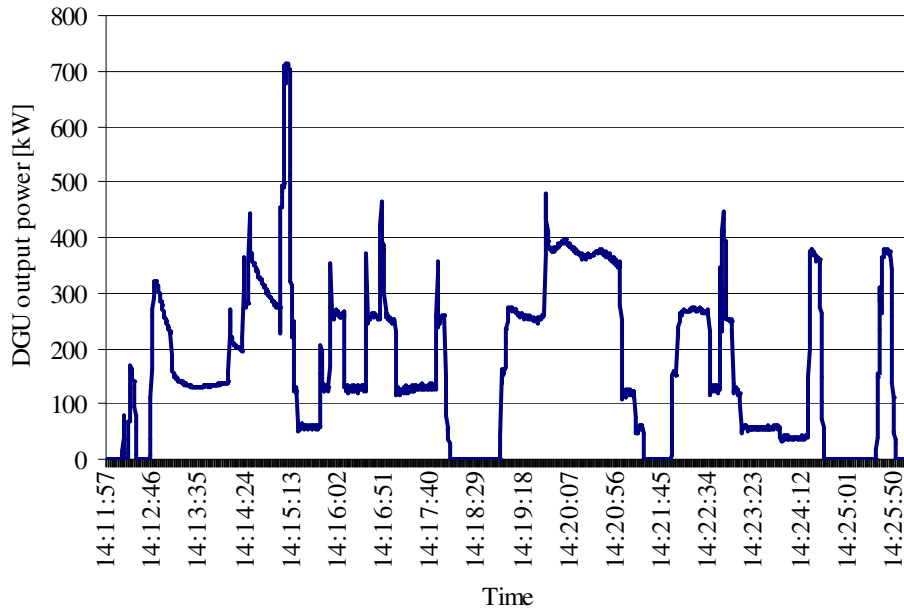


Fig. 33. Time plot of the diesel-generator unit output power

Addition of an energy storage unit allows consideration of the shunting locomotive as a series hybrid vehicle (Fig. 34). The drive train operating modes selected by the driving conditions and driver are listed as follows [EHS05] [JAL97]:

1. Hybrid traction mode when additional power is demanded. This occurs during accelerations or moving uphill when both DGU and ESU supply tractive power. This mode can be expressed as $P_{ESU} = P_{DGU} - P_{dem} < 0$, where P_{dem} is the power demand by the driver, P_{DGU} the genset output power and P_{ESU} power supplied by the ESU.
2. ESU-alone traction mode where the power demand is matched solely by the storage $P_{ESU} = -P_{dem} < 0$.
3. Genset-alone traction when the tractive power is supplied only by the engine/generator $P_{dem} = P_{DGU}; P_{ESU} = 0$.
4. ESU charging from the genset when its state of charge falls below the lowest predefined limit. In this case the genset both propels the vehicle and charges the ESU $P_{ESU} = P_{DGU} - P_{dem} > 0$. This mode is possible only when the generator output exceeds tractive power demand.
5. Regenerative braking mode when the energy generated by decelerating traction drive is used to charge the ESU.

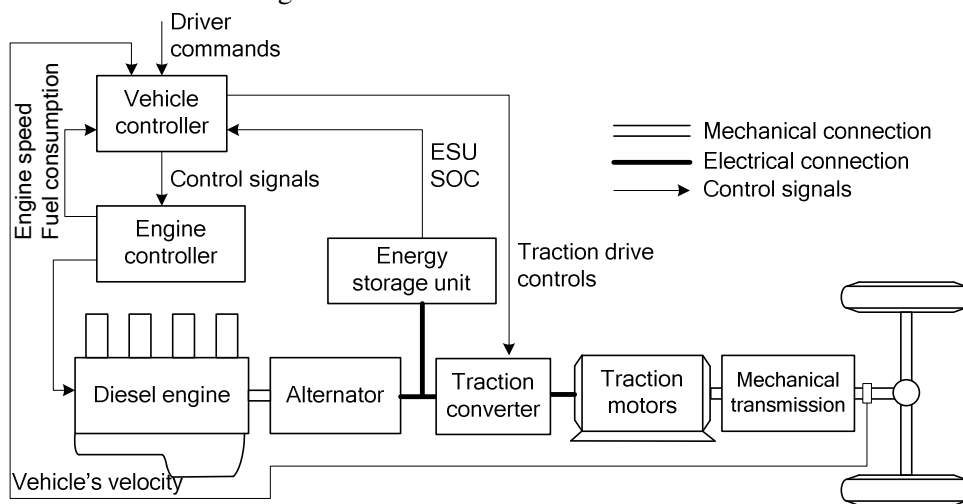


Fig. 34. Typical structure of a series hybrid drive [EHS05]

As energy storage units, flywheels [THE03], ultracapacitors [PIS05] [DES04] [ZHA08], or combined ultracapacitor-electrochemical battery solutions [AYA03] [BEN05] are used in such rolling stock. The necessary storage parameters for a hybrid locomotive can be derived from Eqs. 16...21. In Fig. 35, the assumed influence of storage for a locomotive DGU load diagram is shown. It may be observed that the DGU power can be twice less than at present.

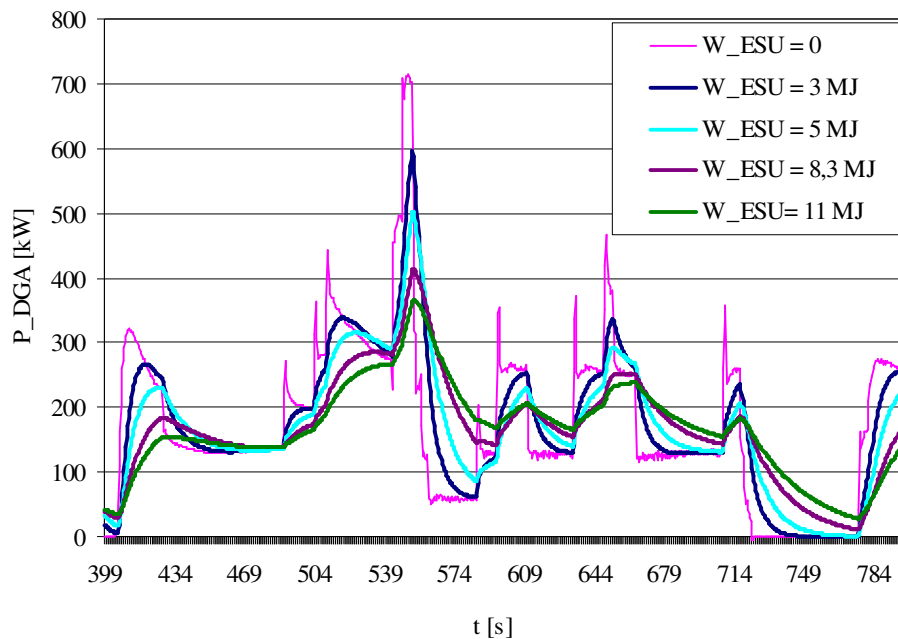


Fig. 35. Influence of the storage capacity on the DGU load

5.2. Assistance for fuel cells

The environmental benefits of fuel cells are overshadowed by high costs and low specific power. The latter disadvantage may be mitigated by the use of storage units as complementary power sources (Fig. 36). There are references both for the road [MIE06] and rail [MIL06] [MOG03] vehicles.

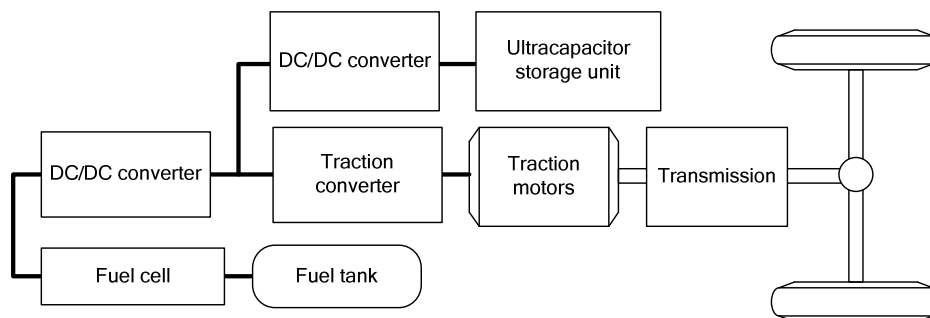


Fig. 36. An electric vehicle supplied by a fuel cell and an energy storage unit [MIE06]

Conclusions and recommendations

The initial state-of-the art analysis brought into light the bottlenecks in the power supply system of catenary-fed electric transportation and possible solutions:

1. The outdated topology of traction substations servicing the tram and trolleybus traffic in Tallinn. Though the losses in substations are marginal compared to

other parts of the infrastructure, it is recommendable to prefer bridge topologies while modernizations and overhauls thanks to a better market penetration and more competitive prices.

2. An ampler use of the load sharing helps to decrease energy transfer losses.
3. Retrofitting the traction substations with anti-parallel regeneration inverters minimizes the cumulative energy consumption by up to 40 %, yet there is no load leveling effect.
4. Up to 40 % of energy savings can be achieved by the use of energy storage units in traction substations. The load leveling effect enables selection of smaller transformers and rectifiers, which may compensate the additional cost posed by the storage units.
5. Excessive voltage drops may be mitigated by the storage substations connected to the line ends. Additionally, braking energy recycling is achieved.
6. The optimal solution in terms of energy efficiency is the application of onboard storage, while the catenary load leveling, undervoltage compensation and recycling of braking energy occur in the vicinity of the load, thus minimizing the transfer losses related to the centralized storage. Additional benefits are the possibility of catenary-free operation and the reduction of contact wire wear.
7. In addition to the hardware methods, the use of organizational means such as real time traffic management and ecodriving must be considered for further enhancement of energy efficiency.

The comparative analysis of energy storage technologies allows the following conclusions:

1. In the city transportation, where the main objectives are load leveling and regenerative energy recycling, only storage units with high specific power may be implemented, which can withstand pulse loads and have a large number of recharge/discharge cycles.
2. Regarding to onboard storage, the present state-of-the-art favors the use of flywheel and supercapacitive storage, the latter having simpler interfaces. As an perspective technology, the lithium-ion batteries having good specific energy may be attractive for catenary-free operation.
3. In traction and track-side storage substations, where the installation space is less limited, flywheel storage units should be preferred thanks to more advantageous total ownership costs.

The proposed statistics-based calculation methodology was applied to the data samples acquired during the previous investigation of electrical transportation in Tallinn. The main conclusions are as follows:

1. The storage parameters for load leveling depend heavily on vehicle's mass. The calculated storage units for trolleybuses have smaller powers and capacities than those for the rail vehicles.
2. By studying the voltage diagrams of older, thyristor-commutated drive trolleybuses, the occurrence of transient peak voltages was detected. This seemingly secondary result left without any previous attention must give the

authorities a hint to check the electromagnetic compatibility of the type 14Tr and 15Tr trolleybuses.

3. The onboard storage shows the best performance if used on vehicles with regenerative drives.
4. The stored regenerative energy grows together with the vehicle's mass and velocity squared. Therefore, the storage power must be great enough to absorb the braking energy during intensive decelerations or the deceleration must be limited to allow regenerative braking with less power.
5. There are route sections in the Tallinn city center where thanks to the flat track profile and the use of regenerative braking the energy consumption per distance unit is less than the route's average. In such sections it might be thinkable to partly dismantle the contact lines.
6. A storage unit, installed into a substation, has the shortest pay-off time.

The ultracapacitor batteries might be used to improve the performance of a tram's extra-low-voltage circuits. During the experiments and theoretical calculations the following conclusions were drawn:

1. The existing NiCd batteries of the KT4 tramcars have in most cases exhausted their lifetime resources and cannot completely fulfill their tasks if the primary supply has been cut off.
2. A combined electrochemical-ultracapacitor battery shows better performance at peak loads and can more effectively guarantee the operation of critical circuits like the electromagnetic track brake.

The proposed calculation methods can be transferred to the hybrid vehicles and to the vehicles moving solely on stored energy with the following benefits:

1. A properly designed storage unit helps to decrease the fuel consumption in hybrid vehicles.
2. The calculation methods may be applied to the fuel cell vehicles as well.

References

- [AKL07] **Akli C. R., Roboam X., Sareni B., Jeunesse A.** 2007. Energy management and sizing of a hybrid locomotive – Proc. of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Sept 2-5, 2007, 10 p.
- [AYA03] **Ayad M. Y., Raël S., Davat B.** 2003. Hybrid power source using supercapacitors and batteries – Proc. of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-4, 2003, 10 p.
- [BEN05] **Bentley P., Stone D.A.** 2005. The parallel combination of a valve regulated lead acid cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer – Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, 10 p.
- [BOI01] **Boiko V., Lehtla M., Vinnikov D., Joller J.** 2001. Lepinguline uurimistöö nr. 130L. Elektriraudtee kontakivõrgu ja veoalajaamade tehnilise seisundi uuring. Lõpparuanne, TTÜ elektriainjamite ja jõuelektronika instituut, 2001, 42 lk.

- [BOI02] **Boiko V., Vinnikov D., Joller J.** 2002. Starting of a Diesel Engine by Help of Ultracapacitors – Proc. of the 8th Baltic Electronics Conference, Oct 6-9, 2002, pp 405 - 406.
- [CHA07] **Chapelsky C., Salmon J., Knight A.** 2007. Control of a High-Inertia Flywheel as Part of a High Capacity Energy Storage System – Proc. of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2-26 Apr. 2007, pp. 1437-1440
- [CHE06] **Cheng J., Mierlo J. et al.** 2006. Super Capacitor based Energy Storage as Peak Power Unit in the Applications of Hybrid Electric Vehicles – Proc. of the 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Mar 2006, pp. 404-408.
- [DES04] **Destraz B., Barrade P., Rufer A.** 2004. Power Assistance for Diesel-Electric Locomotives with Supercapacitive Energy Storage – Proc. of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, pp 677-682.
- [DES07] **Destraz B., Barrade P., Rufer A., Klohr M.** 2007. Study and Simulation of the Energy Balance of an Urban Transportation Network – Proc. of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Sept 2-5, 2007, 10 p.
- [EHS05] **Ehsani M., Gao Y., Gay S.E., Emadi A.** 2005. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. Boca Raton CRC Press, 2005, 395 p.
- [ENE08] **Eesti Energiatehnoloogia Programm.** 2008. <http://www.mkm.ee/?id=345205>, 36 lk.
- [ESA07] **Electricity Storage Association.** 2007. Technology comparisons – <http://www.electricitystorage.org/>
- [EUR05] **Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu** 2005. Direktiiv 2005/32/EÜ, 6. juuli 2005., 30 lk.
- [EVS03] **European Standard EN 13452-1:2003.** Railway applications - Braking - Mass transit brake system - Part 1: Performance requirements. 31 p.
- [EVS05] **European Standard EN 50163:2005.** Railway applications - Supply voltages of traction systems, 31 p.
- [EVS07] **European Standard EN 50155:2007.** Railway applications - Electronic equipment used on rolling stock. 32 p.
- [FLA05] **Flaherty P. A.** 2005. Multi-Stage Hybrid Drives For Traction Applications – Proc. of the ASME/IEEE 2005 Joint Rail Conference, March 15-18, 2005, pp. 171-175.
- [FLO95] **Flowers J. B.** 1995. Load Sharing With Thyristor Controlled Rectifier Substations – Proc. of the IEEE/ASME 1995 Joint Railroad Conference, 4-6 April 1995, pp. 69-73
- [FUX07] **Fu X. X., Xie X.** 2007. The Control Strategy of Flywheel Battery for Electric Vehicles – Proc. of the 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, May 30 - June 1, 2007, pp. 492-496.

- [GIZ08] **Gizinski Z., Gasiewski M., Mascibrodzki I. et al.** 2008. Hybrid-type system of power supply for a trolleybus with an asynchronous motor – Proc. of the 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 1-3 Sept. 2008, pp. 1585-1590.
- [GUN05] **Gunselmann W.** 2005. Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems – Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, 10 p.
- [HAL02] **Halfmann U., Hein G., Olsen H., Röhlig S.** 2002. Wirtschaftliche Optimierung von Stadtbahnen durch Nutzung der Bremsenergie in Energiespeichern – VDE-Bericht zum VDE Kongress 2002 NetWorlds, Vol. 1, 2002, pp. 419-425.
- [JAL97] **Jalil N., Kheir N. A., Salman M.** 1997. A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle – Proc. of the American Control Conference, June 1997, pp. 689-693.
- [JOL02] **Joller J., Lehtla M.** 2002. Power analyse of a tram system with energy storage devices. – Proc. of the 8th Biennial Baltic Electronics Conference. October 6-9, 2002, 2 p.
- [JOL98] **Joller J., Mälter M., Arukivi A.** 1998. Lepinguline uurimistöo nr. 744L. Tallinna Trammi- ja Trollibussikoondise veeremi elektriagamite tehnilis-majanduslike näitajate teoreetiline ja eksperimentaalne uuring. Lõpparuanne. II köide, TTÜ elektriagamite ja jõuelektronika instituut, 1998, 365 lk.
- [KIM08] **Kim B. G., Tredau F. P., Zalameh Z. M.** 2008. Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles – Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept 3-5, 2008, 5 p.
- [KOE05] **Koerner O., Brand J., Rechenberg K.** 2005. Energy Efficient Drive System for a Diesel Electric Shunting Locomotive – Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, 10 p.
- [LIN04] **Linder U.** 2004. Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung. Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme der TU Berlin, 253 p.
- [LIU09] **Liu H., Mao C. et al.** 2009. Electronic power transformer with supercapacitors storage energy system – Electric Power Systems Research, No. 79, 2009, pp. 1200-1208.
- [LOH04] **Lohner A., Evers V.** 2004. Intelligent power management of a supercapacitor based hybrid power train for light-rail vehicles and city busses – Proc. of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, 20-25 June 2004, pp 672-676.
- [MÄG07] **Mägi M.** 2007. Analysis of modelling electric transportation networks – Proc. of the doctoral school of energy- and geotechnology, Jan 15–20, 2007, pp. 73-77.
- [MEI07] **Meinert M., Rechenberg K., Hein G.** 2007. Energy efficient solutions for the complete railway system – Proc. of the International ETG Congress, Oct 23-24, 2007, 7 p.

- [MIE06] **van Mierlo J, Cheng Y., Timmermans J. M., van der Bossche P.** 2006. Comparison of Fuel Cell Hybrid Propulsion Topologies with Super-Capacitor – Proc. of the 12th Power Electronics and Motion Control Conference, Aug 30 - Sept. 1, 2006, pp. 501-505.
- [MIL06] **Miller A., Peters J.** 2006. Fuelcell Hybrid Locomotives: Applications and Benefits – Proc. of the 2006 JRC2006 Joint Rail Conference, April 4-6, 2006, pp. 287-293.
- [MOG03] **Moghbelli H, Gao Y., Langari R., Ehsani M.** 2003. Investigation of Hybrid Fuel Cell (HFC) Technology Applications on the Future Passenger Railroad Transportation – Proc. of the 2003 ASME/IEEE Joint Rail Conference, April 22-24, 2003, pp. 39-53.
- [MÖL05] **Möller T., Lehtla M., Rosin A. et al.** 2005. . Projekt nr 565F. Elektriraudtee veeremi elektri- ja infosüsteemide renoveerimine. Aruanne, TTÜ elektri- ja jõuelektronika instituut, 2005, 18 lk.
- [NIL96] **Nilsson J. W.** 1996. Electric Circuits. Addison-Wesley, 1996, 983 p.
- [OGA07] **Ogasa M., Taguchi Y.** 2007. Power electronics technologies for a lithium ion battery tram – Proc. of the Power Conversion Conference, 2-5 June 2007, pp. 1369-1375.
- [PAA05] **Paatero J. V., Lund P. D.** 2005. Effect on Energy Storage on Variations in Wind Power – Wind Energy, Volume 8, Issue 4, 10/2005, pp. 421-441.
- [PIS05] **Pisu P., Rizzoni G.** 2005. A Supervisory Control Strategy for Series Hybrid Electric Vehicles with Two Energy Storage Systems – Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept. 7-9, 2005, pp. 65-72.
- [RAW08] **Rawicki S.** 2008. Energy Saving Control of Tram Motors Taking Light Signalling into Account – Proc. of the 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 1-3 Sept. 2008, pp. 1504-1513.
- [ROS06] **rosseta Technik GmbH.** 2006. Energiespeicher für das Straßenbahnnetz. <http://www.rosseta.de/texte/bahnsr.pdf>
- [RUF04] **Rufer A., Hotellier D., Barrade P.** 2004. A Supercapacitor-Based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, 2004, pp. 629-636.
- [SAF08] **Saft Space & Defense Division.** 2008. Li-ion energy storage systems for large space and defense applications – Doc N° 54069-2-1008, Edition October 2008, 6 p.
- [SAG04] **Sagareli S., Gelman V.** 2004. Implementation of New Technologies in Traction Power Systems – Proc. of the 2004 ASME/IEEE Joint Rail Conference, April 6-8, 2004, pp. 141-146.
- [SIE09] **Siemens Mobility.** 2009. <http://www.transportation.siemens.com/>
- [STE04] **Steiner M., Scholten J.** 2004. Energy Storage on board of DC fed railway vehicles – Proc. of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, 20-25 June 2004, pp 666-671.
- [STE07] **Steiner M., Klohr M.** 2007. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles – Proc. of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Sept 2-5, 2007, 10 p.

- [SUZ82] **Suzuki T.** 1982. DC power-supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes – IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 129, Issue 1, Jan 1982, pp. 18-26.
- [TAK02] **Takahara E., Waaksa T., Yamada J.** 2002. A Study for Electric Double Layer Capacitor (EDLC) Application to Railway Traction Energy Saving including Change Over between Series and Parallel Modes – Proc. of the Power Conversion Conference, Vol. 2, April 2-5, 2002, pp. 855-860.
- [THE03] **Thelen R. F., Herbst J. D., Caprio M. T.** 2003. A 2MW Flywheel for Hybrid Locomotive Power – Proc. of the IEEE 58th Vehicular Technology Conference, Volume 5, 6-9 Oct 2003, pp. 3231-3235.
- [ULE05] **ULEV-TAP2.** 2005. Ultra Low Emission Vehicle - Transport using Advanced Propulsion 2. Public Report 12/2005, 17 p., <http://www.ulev-tap.org/>
- [VIN05] **Vinnikov D.** 2005. Research, Design and Implementation of Auxiliary Power Supplies for the Light Rail Vehicles – Doctoral thesis on power engineering, electrical engineering, mining engineering, TTU Press, 2005, 74 p.
- [WER07] **Werfel F. N., Floegel-Delor U., Riedel T.** 2007. Compact HTS 5 kWh/250 kW Flywheel Energy Storage System – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, June 2007, pp. 2138-2141.
- [XUZ02] **Xu Z., Zhang B. et al.** 2002. The Emitter Turn-Off Thyristor-Based DC Circuit Breaker – Proc. of the IEEE Power Engineering Society winter Meeting, Jan 27-31, 2002, Vol. 1, pp 288-293.
- [ZHA08] **Zhao Y., Yao J., Zhong Z., Sun Z.** 2008. The Research of Powertrain for SuperCapacitor-based Series Hybrid Bus – Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept. 3-5, 2008, 4 p.