

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Linards Grigāns

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**REKUPERĒTĀS ELEKTRISKĀS ENERĢIJAS IZMANTOŠANA
PILSĒTAS ELEKTROTRANSPORTĀ, PIELIETOJOT
SUPERKONDENSATORUS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.sc.ing., asoc. profesors
L. LATKOVSKIS

Rīga 2012

UDK 621.31(043)
Gr 530 r

Grigāns L. Rekuperētās elektriskās enerģijas izmantošana pilsētas elektrotransportā, pielietojot superkondensatorus. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.-49 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta 2012.gada 23. februāra lēmumu, protokols Nr.61.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektos «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai» un «Eiropas enerģētikas tehnoloģiju stratēģiskā plāna Latvijas aktivitāšu zinātniskā atbalsta grupa», No.1DP/1.1.1.2.0./09/APIA/VIAA/027.

ISBN 978-9934-10-319-3

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.g. 25. jūlijā plks. 10:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 117 telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Ivars Raņķis
Rīgas Tehniskā universitāte

Vadošais pētnieks, Dr.sc.ing. Dmitrijs Vinnikovs
Tallinas Tehnoloģiskā universitāte

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Andris Šnīders
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Linards Grigāns(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 4 pielikumus, 138 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 132 lappuses. Literatūras sarakstā ir 86 nosaukumi.

TĒMAS AKTUALITĀTE

Līdz ar Rīgas pilsētas elektriskā transporta parka atjaunošanu gandrīz jau visiem tramvajiem un trolejbusiem piemīt spēja rekuperēt bremzēšanas enerģiju atpakaļ kontakttīklā. Taču kontakttīkla segmentētās barošanas topoloģijas, kā arī nereversīvo taisngriežu barošanas apakšstaciju dēļ ne vienmēr šī rekuperētā enerģija var tikt lietderīgi izmantota. Ja bremzēšanas brīdī tajā pašā kontakttīkla apgabalā nav cita transportlīdzekļa, kas tobrīd enerģiju patērē, tad rekuperētā enerģija joprojām tiek izkliedēta bremzēšanas reostatos.

DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Šī darba mērķis ir pilsētas elektrotransporta energoefektivitātes paaugstināšana, ko varētu panākt, pielietojot superkondensatoru enerģijas uzkrājējsistēmas, tādējādi samazinot bremžu reostatos izkliedētās enerģijas daudzumu. Līdz ar to promocijas darba mērķa sasniegšanai tika risināti sekojoši uzdevumi:

- Izstrādāt metodiku reostatos izkliedētās enerģijas daudzuma novērtēšanai;
- Izstrādāt metodiku, kas ļautu novērtēt enerģijas ietaupījumu atkarībā no uzkrājēja parametriem;
- Novērtēt rekuperētās enerģijas rezerves Rīgas elektriskā transporta tīklā;
- Izpētīt superkondensatoru kā potenciālā rekuperētās enerģijas uzkrājēja īpašības un ar to pielietojumu saistītās problēmas;
- Izstrādāt transportlīdzeklī uzstādāmu superkondensatoru enerģijas uzkrājējsistēmas un to simulēšanas modeļus;
- Veikt modelēšanas rezultātu analīzi.

PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES

- Apakšstaciju un transportlīdzekļu jaudas diagrammu iegūšanai veikti praktiski mērījumi SIA „Rīgas satiksme” tramvajos T3A un barošanas apakšstacijās.
- Datu apstrāde un algoritmu izstrāde veikta, izmantojot MATLAB programmu.
- Neizmantotās rekuperētās enerģijas daudzuma novērtēšanas metodikas izstrādē izmantoti varbūtību teorijas principi (varbūtību sadalījuma blīvuma funkcija, kompozīcijas integrālis).
- Transportlīdzeklī uzstādāmu enerģijas uzkrājēju izstrāde un modelēšana veikta, izmantojot programmas PSIM un SIMULINK.
- Eksperimentos tika izmantota Fizikālās enerģētikas institūta Energoelektronikas laboratorijas tehniskā bāze un iekārtas.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

- Izstrādāta neizmantotās rekuperētās bremzēšanas enerģijas novērtēšanas metodika.
- Izstrādāta metodika saglābjamās enerģijas daudzuma novērtēšanai, atkarībā no enerģijas uzkrājēja jaudas spējas un enerģijas ietilpības.
- Izstrādāta autonomas darbības transportlīdzeklī uzstādāma superkondensatoru enerģijas uzkrājējsistēma un tās simulēšanas modelis PSIM vidē.

- Izstrādātas ar transportlīdzekļa vadību saistītas enerģijas uzkrājēj sistēmas un to simulēšanas modeļi SIMULINK un PSIM vidē.
- Pētītas dažādas transportlīdzeklī uzstādāma enerģijas uzkrājēja vadības stratēģijas un veikts to efektivitātes salīdzinājums.
- Piedāvāts kapacitāšu balansēšanas princips un veikta tā efektivitātes teorētiska izpēte.

DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

- Izstrādātā jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma metodika pielietojama neizmantotās rekuperētās enerģijas daudzuma novērtēšanai tīkliem ar radiālu barošanas topoloģiju.
- Izstrādātā stohastiskās modelēšanas metodika pielietojama enerģijas uzkrājēju optimālai dimensionēšanai.
- Izstrādātie autonomas darbības enerģijas uzkrājēja, kā arī ar transportlīdzekļa vadību saistītu enerģijas uzkrājēju vadības sistēmu modeļi var tikt izmantoti kā paraugi, izstrādājot reālas ierīces.
- Kapacitāšu balansēšanas princips ļautu palielināt superkondensatoru baterijas enerģijas ietilpību, kā arī ietaupīt uz balansēšanas ķēžu rēķina.

DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti sekojošās zinātniskās konferencēs:

1. 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University on “Power and Electrical Engineering”, Riga, Latvia, 13-15 October, 2011.
2. 14th European Conference on Power Electronics and Applications “EPE2011 ECCE Europe”, Birmingham, UK, August 30 – September 1, 2011.
3. 10th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering 2011”, Pärnu, Estonia, January 10-15, 2011
4. 14th International Power Electronics and Motion Control Conference “EPE-PEMC 2010”, Ohrid, Macedonia, 6-8 September, 2010.
5. 13th European Conference on Power Electronics and Applications “EPE 09”, Barcelona, Spain, 8-10 September, 2009.
6. 4th International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems “ITELMS 2009”, Panevėžys, Lithuania, June 4-5, 2009.
7. 13th Power Electronics and Motion Control Conference “EPE-PEMC 2008”, Poznan, Poland, 1-3 September 2008.
8. 5th Conference of Young Scientists on Energy Issues “CYSENI 2008”, Kaunas, Lithuania, May 29, 2008.

PUBLIKĀCIJAS

1. L. Latkovskis, L. Grigāns, "Pilsētas elektrotransportā neizmantojams rekuperētās enerģijas aprēķina metodika," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 4, pp. 21-28, 2007.
2. L. Grigans and L. Latkovskis, "A Method for Estimation of the Untapped Regenerative Braking Energy in Urban Electric Transport," in *5th Conference of Young Scientists on Energy Issues CYSENI 2008*, Kaunas, Lithuania, 2008, pp. 41-48.
3. L. Latkovskis and L. Grigans, "Estimation of the untapped regenerative braking energy in urban electric transportation network," in *13th Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008*, Poznan, Poland, 2008, pp. 2089 - 2093.
4. L. Latkovskis and L. Grigans, "Continuous PSIM Model of the Supercapacitor Energy Storage System for Simulation of Long Processes," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 5, pp. 13-20, 2009.
5. V. Brazis, M. Gorobecs, L. Grigans, and A. Levcenkovs, "Optimization of Energy Consumption for Light Rail Electric Transport with Supercapacitor System Using Neural Network Controllers," in *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems: ITELMS 2009: Proceedings of the 4th International Conference*, Lithuania, Panevėžys, 2009, pp. 118-126.
6. L. Grigans and L. Latkovskis, "Estimation of the power and energy requirements for trackside energy storage systems," in *13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 09*, Spain, Barcelona, 2009, p. P1-P7.
7. V. Brazis, L. Latkovskis, and L. Grigans, "Simulation of Trolleybus Traction Induction Drive with Supercapacitor Energy Storage System," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 5, pp. 33-47, 2010.
8. L. Latkovskis, L. Grigāns, J. Černovs, U. Sirmelis, "Neizmantojams rekuperētās enerģijas aplēse Rīgas elektriskajā sabiedriskajā transportā," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 1, pp. 47-56, 2010.
9. L. Latkovskis, V. Brazis, and L. Grigans, "Simulation of On-Board Supercapacitor Energy Storage System for Tatra T3A Type Tramcars," in *Modelling Simulation and Optimization*, Gregorio Romero Rey and Luisa Martinez Muneta (Ed.), InTech, 2010, pp. 307-330.
10. L. Grigans and L. Latkovskis, "Study of control strategies for energy storage system on board of urban electric vehicles," in *14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, Macedonia, Ohrid, 2010, pp. T9-34-T9-38.
11. U. Sirmelis and L. Grigans, "Capacitance balancing for supercapacitive energy storage system," in *10th International Symposium – Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering*, Estonia, Pärnu, 2011.

12. U. Sirmelis, L. Grigans, and L. Latkovskis, "An analytic simulation model for a supercapacitor-based energy storage system," in *EPE2011 ECCE Europe*, Birmingham, UK, 2011, p. 10.
13. V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, and L. Grigans, "Traction Drive Load Simulator," in *Proceedings of the 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering*, Riga, Latvia, 2011, p. 6.
14. V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, L. Grigans, and U. Sirmelis, "Simulation of the Light Railway Traction Drive with Energy Storage System," in *Proceedings of the 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering*, Riga, Latvia, 2011, p. 7.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

IEVADS

1. RĪGAS ELEKTRISKAIS TRANSPORTS UN TĀ PIEDZIŅAS VEIDI

- 1.1. Līdzstrāvas piedziņa ar reostatu palaišanu un mehānisko vai dinamisko (reostatu) bremzēšanu
- 1.2. Līdzstrāvas piedziņa ar impulsu pārveidotāju un dinamisko bremzēšanu
- 1.3. Līdzstrāvas piedziņa ar impulsu pārveidotāju un rekuperatīvo bremzēšanu
- 1.4. Regulējama asinhronā (vai sinhronā) piedziņa ar rekuperatīvo bremzēšanu
- 1.5. Rīgas elektriskā transporta parks

2. NEIZMANTOTĀS REKUPERĒTĀS ENERĢIJAS APRĒĶINA METODIKA UN TĀS PIELIETOJUMS

- 2.1. Neizmantotās rekuperētās enerģijas novērtēšanas principu apskats
- 2.2. Transportlīdzekļa jaudas patēriņa diagrammu iegūšana
- 2.3. Jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma metodika bremzēšanas reostatos izkliedētās jaudas/enerģijas novērtēšanai
- 2.4. Stohastiskās modelēšanas metodika
- 2.5. Transportlīdzekļu kustības grafika izmantošanas divas metodes
- 2.6. Aprēķinu rezultāti 18 Rīgas perifērijas apakšstacijām

3. SUPERKONDENSATORI

- 3.1. Superkondensatoru īpašības, ekvivalentās shēmas
- 3.2. Spriegumu balansēšanas problēmas risinājumi

4. REKUPERĒTĀS ENERĢIJAS IZMANTOŠANA

- 4.1. Rekuperētās enerģijas izmantošanas varianti
- 4.2. Autonomas darbības enerģijas uzkrājēja uzstādīšana tramvajā
- 4.3. Ar transportlīdzekļa vadību saistīta EUS
- 4.4. Asinhronās piedziņas transportlīdzeklis ar EUS
- 4.5. EUS vadības stratēģijas

5. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

- 5.1. Jaudas patēriņa diagrammas iegūšana tramvajam T3A
- 5.2. Superkondensatoru kapacitātes mērīšana

SLĒDZIENS

LITERATŪRA

PIELIKUMI

IEVADS

Līdz ar Rīgas pilsētas elektriskā transporta parka atjaunošanu gandrīz jau visiem tramvajiem un trolejbusiem piemīt spēja rekuperēt bremzēšanas enerģiju atpakaļ kontakttīklā. Taču kontakttīkla segmentētās barošanas topoloģijas, kā arī nereversīvo taisngriežu barošanas apakšstaciju dēļ ne vienmēr šī rekuperētā enerģija var tikt lietderīgi izmantota. Ja bremzēšanas brīdī tajā pašā kontakttīkla apgabalā nav cita transportlīdzekļa, kas tobrīd enerģiju patērē, tad rekuperētā enerģija joprojām tiek izkliedēta bremzēšanas reostatos.

Šī ir apslēpta enerģijas rezerve, kas pagaidām netiek izmantota, bet kuru ir iespējams utilizēt, tādā veidā samazinot kopējo enerģijas patēriņu. Ir trīs pamata risinājumi, kā to var izdarīt:

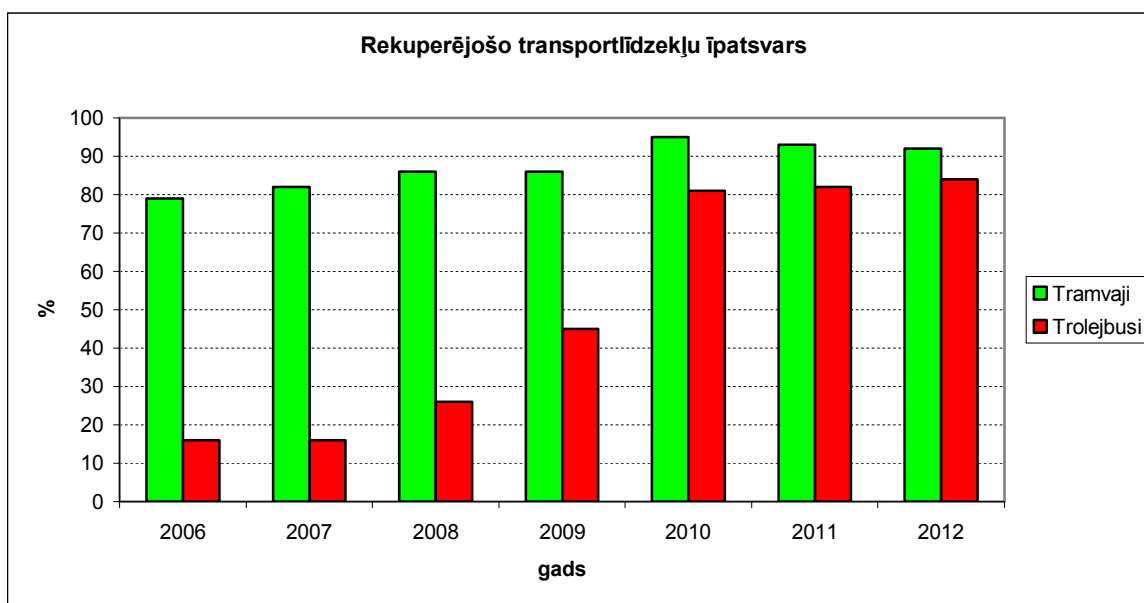
- aprīkot apakšstacijas ar reversīviem taisngriežiem [4–6];
- uzstādīt enerģijas uzkrājējus transportlīdzekļos [7–11];
- uzstādīt stacionārus enerģijas uzkrājējus apakšstacijās vai optimālajās to pieslēguma vietās kontakttīklam [12–15].

Šis promocijas darbs veltīts enerģijas daudzuma novērtēšanai, kas zūd tramvaju un trolejbusu bremzēšanas reostatos, kā arī pētīti šīs enerģijas izmantošanas varianti, pielietojot superkondensatoru enerģijas uzkrājējus.

1. RĪGAS ELEKTRISKAIS TRANSPORTS UN TĀ PIEDZIŅAS VEIDI

Šajā nodaļā dots īss katra elektriskās vilces piedziņas veida apraksts, kā arī sniegts ieskats Rīgas elektriskā transporta parka esošajā stāvoklī un attīstības dinamikā.

Diagramma (1.1. att.) labi ilustrē rekuperētās enerģijas racionālas izmantošanas problēmas aktualitāti. Ja pirms pāris gadiem to varēja attiecināt tikai uz tramvaju līnijām (un apakšstacijām, kas tās baro), tad tagad, kad rekuperējošo trolejbusu īpatsvars ir ievērojami palielinājies, šī problēma kļūst aktuāla visā Rīgas elektriskā sabiedriskā transporta tīklā. Nav šaubu, ka pēc pāris gadiem rekuperējošo vienību īpatsvars Rīgas sabiedriskajā elektriskajā transportā cieši pietuvosies 100% robežai.



1.1. att. Rekuperējošo vienību īpatsvars Rīgas sabiedriskajā elektriskajā transportā

Turpmākos neizmantotās rekuperētās bremzēšanas enerģijas aprēķinos tiek pieņemts, ka visi transportlīdzekļi ir rekuperējoši, kas atbilst ne pārāk tālai nākotnes perspektīvai.

2. NEIZMANTOTĀS REKUPERĒTĀS ENERĢIJAS APRĒĶINA METODIKA UN TĀS PIELIETOJUMS

Tramvaju-trolejbusu barošanas tīklā neizmantotās rekuperētās enerģijas daudzuma aplēse ir vajadzīga, lai novērtētu potenciāli iespējamo enerģijas ekonomiju un kāds ir ekonomiski pamatotākais enerģijas patēriņa samazināšanas veids. Neizmantotās enerģijas aplēsei šajā darbā tiek piedāvātas divas dažādas metodikas. Viena, nosauktā par „jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma metodiku”, ļauj novērtēt apakšstacijas barošanas zonā neizmantoto enerģijas rezervi [19], [20]. Savukārt otra piedāvātā metodika „stohastiskās modelēšanas metodika” [21] bez neizmantotās enerģijas rezervju novērtēšanas ļauj arī noteikt, cik enerģijas uzkrājējsistēma (EUS) ar noteiktu enerģijas ietilpību un noteiktu jaudas spēju spēs saglābt rekuperēto enerģiju, tādējādi palīdzot izvēlēties ekonomiski izdevīgāko EUS.

Abas metodikas ir principiāli atšķirīgas, bet abām šīm metodēm ir nepieciešamas transportlīdzekļu jaudas diagrammas, kuras savukārt var dažādi iegūt [22–26]. Šajā darbā tiek izmantotas eksperimentāli iegūtās transportlīdzekļu jaudas diagrammas. Tāpēc šajā nodaļā ir definēts „transportlīdzekļa jaudas” jēdziens. Dots literatūras apskats par neizmantotās rekuperētās enerģijas novērtēšanas principiem un pēc tam aprakstītas abas neizmantotās rekuperētās enerģijas aprēķina metodikas.

Nodaļas beigās dots aprēķinu gaitas apraksts konkrētu apakšstaciju barošanas apgabalos neizmantotās enerģijas rezervju aplēsei, pielietojot jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma metodiku. Dots apraksts, kā praktiski pietiekami ātri un vienkārši no internetā pieejamā tramvaju-trolejbusu kustības grafika iegūt metodikai nepieciešamo informāciju, kā arī veikta neizmantotās rekuperētās enerģijas rezervju aplēse 18 no 34 Rīgas elektriskā transporta apakšstacijām [27].

Neizmantotās rekuperētās enerģijas novērtēšanas principu apskats

Literatūrā pieminētos elektriskā transporta tīklā neizmantotās bremzēšanas enerģijas daudzuma novērtēšanas principus nosacīti var iedalīt divās grupās, kur vienā tiek izveidots un izmantots transporta sistēmas simulēšanas modelis [23], [26], [28–34], savukārt otrā tiek operēts ar vispārīgiem transporta sistēmas parametriem tādiem kā vidējā bremzēšanas enerģija vai jauda, jaudas varbūtību blīvuma funkcijas, rekuperētās enerģijas izmantošanas koeficients, vidējais bremzēšanu skaits diennaktī utml. [5], [7], [35–37].

Elektriskā transporta sistēmas modelēšana kā līdzeklis enerģijas plūsmu novērtēšanā ir minēta daudzos literatūras avotos. Esošiem modeļiem, kā ieejas dati, nepieciešama detalizēta informācija par kontakttīkla shēmu, par transportlīdzekļu parametriem, par to kustības grafiku, ātruma diagrammām un ceļa profilu, par apakšstaciju uzbūvi un to izvietojumu. Šādi simulēšanas modeļi parasti ir komplicēti un to simulēšanai nepieciešama liela skaitļošanas jauda. Tāpēc ar šādiem modeļiem uz personālajiem datoriem netiek simulēta transportlīdzekļu darbība visas dienas garumā, bet tiek izmantotas vien pāris minūšu vai stundu garas diagrammas, un pēc tam iegūtos rezultātus pārrēķina uz interesējošo laiku. Galvenokārt simulēšanas modeļi tiek izmantoti, lai demonstrētu sistēmas darbību ar un bez enerģijas uzkrājēja, kā arī veiktu enerģijas uzkrājēja dimensionēšanu [15], [28], [29].

Eksistē arī komerciālas programmatūras kā Sidytrac (Siemens), Elbas (Alstom), ECOtranz (Bombardier) un Fabel (Enotrac), kas paredzētas elektriskā transporta sistēmu simulēšanai. To pielietošana rekuperētās enerģijas izmantošanā ar

reversīvajām apakšstacijām pieminēta literatūrā [34], taču detalizētāka informācija par šīm programmām nav brīvi pieejama.

Pie rekuperētās enerģijas novērtēšanas principu otrās grupas daļēji varētu pieskaitīt metodes, kas aprakstītas literatūrā [7], [35], [36]. Šajos rakstos rekuperētās enerģijas izmantošana tiek pētīta, ieviešot kontakttīklu raksturojošu parametru kā kontakttīkla uzņēmība, jeb rekuperētās enerģijas izmantošanas koeficients. Izmantojot šo koeficientu, iespējams stipri vienkāršot kontakttīkla modeli, tādējādi palielinot aprēķinu ātrdarbību. Literatūrā [35], [36], lai iegūtu šo rekuperētās enerģijas izmantošanas koeficientu, tiek izmantotas vienkāršotas transportlīdzekļu jaudas varbūtību blīvuma funkcijas, savukārt rakstā [7], šis koeficients tiek patvaļīgi pieņemts, kas var būt par ievērojamas neprecizitātes iemeslu. Jāpiemin, ka lielākoties literatūrā pētīta transportlīdzekļu barošanas kontakttīkla shēma, kurai atšķirībā no Rīgas situācijas nav elektriski atsaistīti apakšstaciju barošanas apgabali. Līdz ar to, modelējot rekuperētās enerģijas jaudas plūsmu, ir nepieciešams ņemt vērā kontakttīkla pretestību, jo pretējā gadījumā vienmēr visa rekuperētā enerģija tiktu izmantota.

Rekuperētās enerģijas rezervju aplēse Rīgas elektriskā transporta tīklam apskatīta [5], [37]. Šajos darbos apskatītā metode balstās uz vidējās bremsēšanas enerģijas daudzuma novērtēšanu, ko pēc tam reizina ar vidējo bremsēšanu skaitu un pieņemto rekuperētās enerģijas izmantošanas koeficientu. Šāda aprēķina metode ir ļoti ātra, taču, tā kā šādā aprēķinā ir daudz pieņēmumu, iespējama arī liela kļūda. Tāpēc, lai uzlabotu precizitāti, būtu nepieciešama šo pieņēmumu korekcija, izmantojot kādu precīzāku metodi.

Transportlīdzekļa jaudas patēriņa diagrammu iegūšana

Ar jēdzienu „transportlīdzekļa jaudas patēriņa diagramma” saprotam jaudu $p_{tr}(t)$, ko transportlīdzeklis, pārvietojoties interesējošajā ceļa posmā, patērē no kontakttīkla vai ir spējīgs tam atdot. Pieņemts no kontakttīkla patērēto jaudu $p_{in}(t)$ apzīmēt ar „+” zīmi; šī jauda tiek izlietota transportlīdzekļa vilcei $p_{traction}(t)$ un palīgiekārtu barošanai ($p_{aux}(t)$). Vilces režīmā transportlīdzekļa jauda ir:

$$p_{tr}(t) = p_{in}(t) = p_{traction}(t) + p_{aux}(t) \quad (2.1)$$

Bremzēšanas režīmā ģenerētā jauda daļēji tiek izlietota palīgiekārtu barošanai, bet atlikusī tiek atdota kontakttīklā ar „-” zīmi, vai izkliedēta bremžu reostatā ($p_{br}(t)$):

$$p_{tr}(t) = p_{traction}(t) + p_{aux}(t) = p_{in}(t) - p_{br}(t) \quad (2.2)$$

No izteiksmēm (2.1) un (2.2) izriet divi varianti, kā eksperimentāli reģistrēt transportlīdzekļa jaudu $p_{tr}(t)$:

1. reģistrējot $p_{traction}(t)$ un $p_{aux}(t)$ un aprēķinot $p_{tr}(t)$ no izteiksmes

$$p_{tr}(t) = p_{traction}(t) + p_{aux}(t); \quad (2.3)$$

2. reģistrējot $p_{in}(t)$ un $p_{br}(t)$ un aprēķinot $p_{tr}(t)$ no izteiksmes

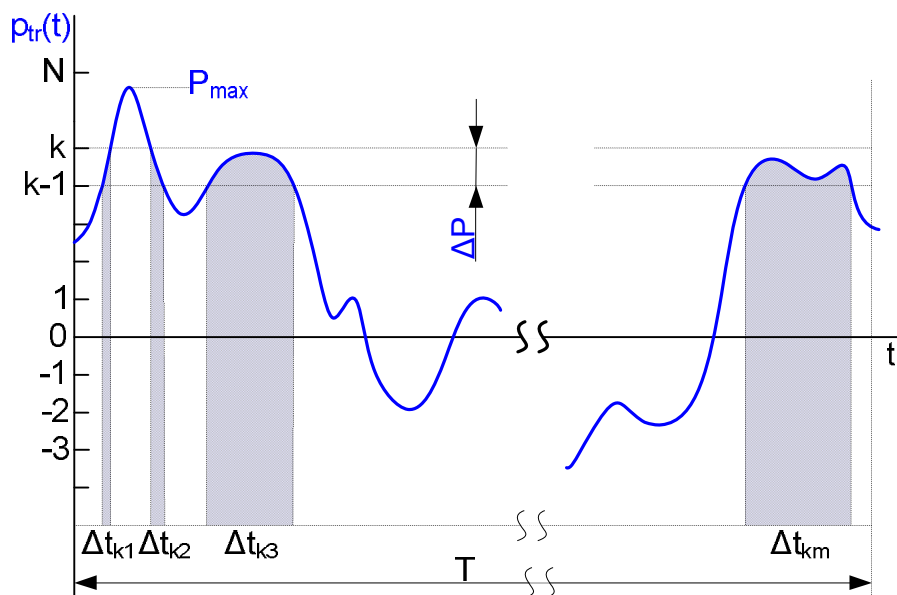
$$p_{tr}(t) = p_{in}(t) - p_{br}(t); \quad (2.4)$$

Varianta izvēle atkarīga no transportlīdzekļa konstrukcijas un tā vadības signālu un datu pieejamības. Šajā darbā par pamata variantu izvēlamies otro, atbilstoši izteiksmei (2.4).

Jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma metodika bremsēšanas reostatos izklaidētās jaudas/enerģijas novērtēšanai

Kaut arī transportlīdzekļa kustība kontakttīkla apgabalā, kuru baro viena apakšstacija, notiek saskaņā ar kustības grafiku un jaudas patēriņa diagrammas raksturs ir samērā prognozējams, tomēr jebkurā brīvi izvēlētajā laika momentā transportlīdzekļa patērētajai jaudai ir gadījuma raksturs. Kā jebkuru gadījuma lielumu to var raksturot ar jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma funkciju, kura ļauj noteikt, ar kādu varbūtību jauda var atrasties kādā intervālā [38], [39].

Pieņemsim, ka ir reģistrēts transportlīdzekļa jaudas patēriņš $p_{tr}(t)$ interesējošajā sekcijā abos kustības virzienos pietiekami ilgā laika intervālā T . Jaudas patēriņa diagrammas fragments, kā piemērs, parādīts 2.1. att.



2.1. att. Jaudas patēriņa laika diagrammas piemēra fragments

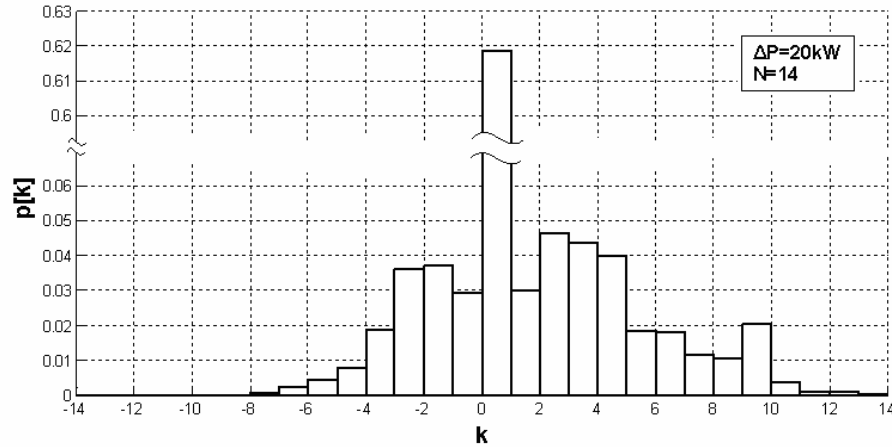
Izvēloties jaudas intervāla platumu vienādu ar ΔP , pozitīvo un negatīvo jaudu diapazonu sadala N daļās tā, lai $\Delta P \cdot N > |P_{max}; P_{min}|$. Piešķirot jaudas intervālam kārtas numuru k vienādu ar intervāla augšējo robežu, varbūtība, ka jauda atradīsies intervālā $\Delta P \cdot (k-1) < P_k < \Delta P \cdot k$ ir:

$$p[k] = \frac{t_k}{T}, \quad (2.5)$$

kur $t_k = \sum_{i=1}^m \Delta t_{ki}$ – summārais laiks, kurā jauda $p_{tr}(t)$ atrodas k -tajā intervālā (skat. 2.1. att.). Tā kā jauda $p_{tr}(t)$ praktiski tiek reģistrēta diskrētos laika momentos ar soli ΔT , tad varbūtība $p[k]$ tiek aprēķināta kā nolasījumu skaita q_k , kuros jauda atrodas k -tajā intervālā, attiecība pret kopējo nolasījumu skaitu Q :

$$p[k] = \frac{q_k}{Q}. \quad (2.6)$$

Funkcija $p[k]$, $k \in [-N; N]$ ir transportlīdzekļa jaudas varbūtību sadalījuma diskrētā blīvuma funkcija, tās iespējamais grafiskais izskats, kā piemērs, parādīts 2.2. att.



2.2. att. Tramvaja T3A jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma funkcija (piemērs)

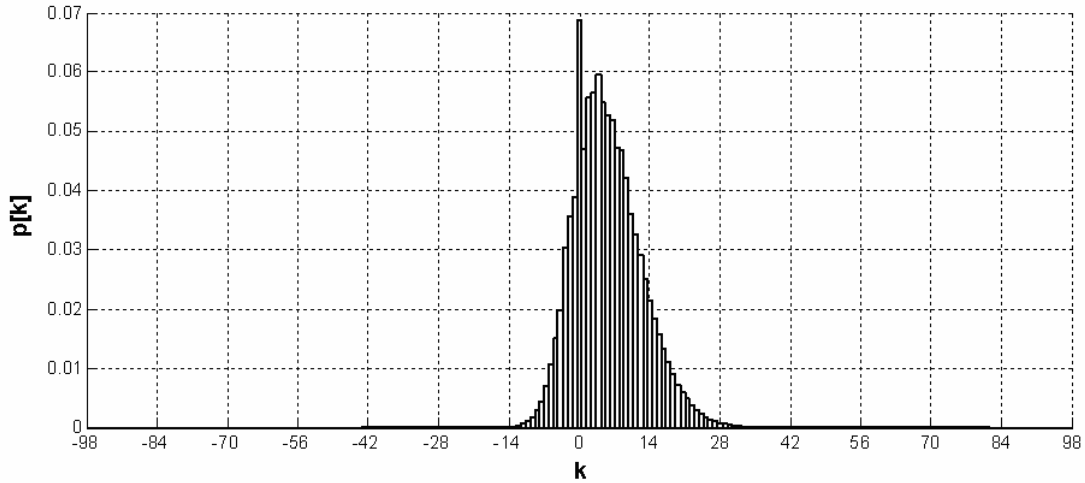
Ja vienā kontakttīkla sekcijā vienlaicīgi atrodas divi dažādu tipu, piemēram, „A” un „B” tipa transportlīdzekļi, tad, pieņemot, ka abu transportlīdzekļu jaudas patēriņam laikā ir gadījuma raksturs un tie ir neatkarīgi procesi, kuru jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma funkcijas ir attiecīgi p_A un p_B , tad summāro varbūtību sadalījuma blīvuma funkciju p_{AB} var noteikt ar kompozīcijas integrāļa palīdzību [40], [41]. Diskrētas varbūtību sadalījuma blīvuma funkcijas gadījumā, ja „A” un „B” tipa transportlīdzekļu jaudas līmeņu skaits ir N , kompozīcijas integrālis pārvēršas summā un iegūst izskatu:

$$p_{AB}[k] = \sum_{m=\max(-N; k-N)}^{\min(N; k+N)} p_A[m]p_B[k-m], \quad k \in [-2N; 2N], \quad (2.7)$$

Ja kontakttīkla barošanas sekcijā vienlaicīgi atrodas vairāki dažādu tipu transportlīdzekļi, rezultējošo jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma funkciju nosaka pakāpenisku aprēķinu ceļā. Piemēram, gadījumam, kad ir l „A” tipa un i „B” tipa transportlīdzekļi, secīgi aprēķina varbūtības $p_{2A}, p_{3A}, \dots, p_{lA}, p_{2B}, p_{3B}, \dots, p_{iB}$ un pēc tam rezultējošo varbūtību p_{lAiB} no izteiksmes:

$$p_{lAiB}[k] = \sum_{m=\max(-(l+i)N; k-(l+i)N)}^{\min((l+i)N; k+(l+i)N)} p_{lA}[m]p_{iB}[k-m], \quad k \in [-(l+i)N; (l+i)N] \quad (2.8)$$

Kā piemērs 2.3. att. parādīta jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma diagramma septiņu viena tipa transportlīdzekļu gadījumā. Tika pieņemts, ka visiem septiņiem transportlīdzekļiem ir vienādas jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma diagrammas, kādas parādītas 2.2. att.



2.3. att. Jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma funkcija septiņu viena tipa tramvaju gadījumam Transportlīdzekļa vidējā patērētā jauda laika intervālā T pēc definīcijas ir:

$$P_{tr,av} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{tr}(t) dt. \quad (2.9)$$

Diskretizējot nepārtraukto funkciju $p_{tr}(t)$, vidējo jaudu var tuvināti izteikt kā:

$$P_{tr,av} \approx \frac{1}{T} \sum_{k=-N}^N P_k t_k = \frac{\Delta P}{T} \sum_{k=-N}^N (k-0.5) t_k, \quad (2.10)$$

kur $P_k = \Delta P \frac{k+(k-1)}{2} = \Delta P(k-0.5)$ ir k -tā līmeņa vidējā jaudas vērtība, bet t_k definēts ar izteiksmi (2.5). Ievietojot izteiksmē (2.10) t_k no izteiksmes (2.5), iegūstam:

$$P_{tr,av} \approx \Delta P \sum_{k=-N}^N (k-0.5) p[k]. \quad (2.11)$$

Vidējo varbūtējo neizmantoto rekuperēto jaudu $P_{j,av}$ jebkurai no iespējamajām j transportlīdzekļu tipa un skaita kombinācijām var aprēķināt, pielietojot izteiksmi (2.11) negatīvo jaudu apgabalam:

$$P_{j,av} = \Delta P \sum_{k=-\infty}^0 (k-0.5) p_j[k], \quad (2.12)$$

bet summāro varbūtējo neizmantoto rekuperēto enerģiju E kā

$$E = \sum_j P_j \tau_j, \quad (2.13)$$

kur τ_j – summārais laiks, kurā šī transportlīdzekļu tipa un skaita kombinācija atrodas kontakttīkla barošanas sekcijas robežās.

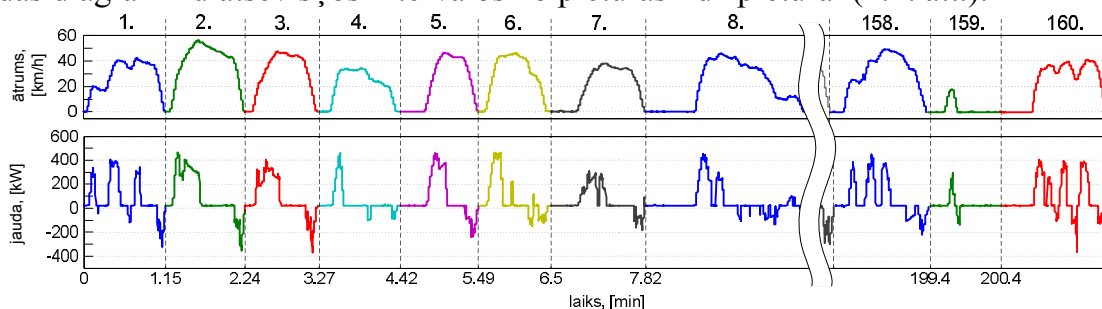
Īsumā neizmantotās rekuperētās enerģijas aprēķina metodiku var raksturot ar šādiem etapiem:

1. Eksperimentāli reģistrē transportlīdzekļu jaudas patēriņu interesējošajā kontakttīkla barošanas sekcijas posmā.
2. Aprēķina jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma funkciju $p[k]$ katram transportlīdzekļu tipam.

3. Pēc kustības grafika nosaka transportlīdzekļu tipa un skaita iespējamās j kombinācijas diennakts laikā un šo kombināciju summāro atrašanās laiku τ_j kontakttīkla barošanas sekcijā.
4. Aprēķina jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma funkcijas $p_j[k]$ visām j transportlīdzekļu kombinācijām.
5. Pielietojot izteiksmi (2.12) aprēķina vidējo varbūtējo neizmantoto jaudu P_j katrai no j kombinācijām.
6. Aprēķina summāro varbūtējo neizmantoto rekuperēto enerģiju E interesējošam laika posmam.

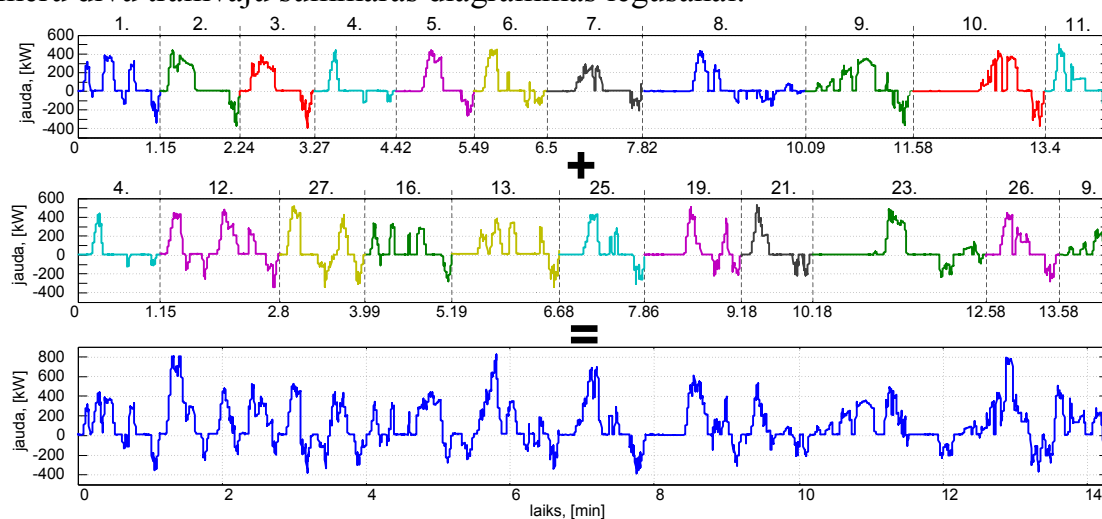
Stohastiskās modelēšanas metodika

Kā otrs šajā darbā izstrādātais neizmantotās rekuperētās enerģijas novērtēšanas paņēmiens ir „stohastiskās modelēšanas metodika”. Šī metodika papildus neizmantotās enerģijas novērtēšanai ļauj arī iegūt ar stacionāru enerģijas uzkrājēju potenciāli saglabjamās enerģijas daudzumu atkarībā no uzkrājēja enerģijas ietilpības un jaudas spējas. Stohastiskās simulēšanas metodikā tiek piedāvāts sadalīt reģistrēto tramvaja jaudas diagrammu atsevišķos intervālos no pieturas līdz pieturai (2.4. att.).



2.4. att. Tramvaja jaudas diagrammas sadalīšana intervālos

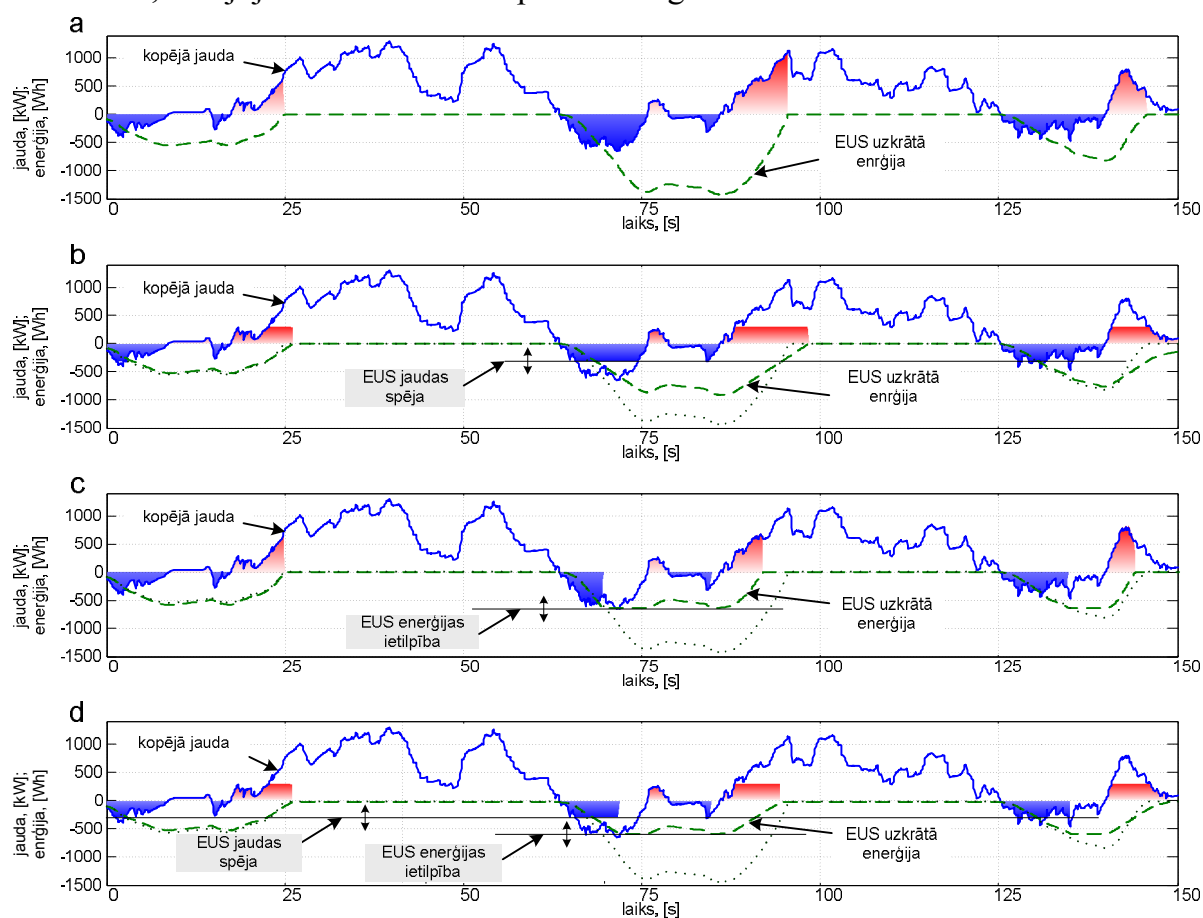
Otra tramvaja jaudas diagramma ir iegūta, patvaļīgi izvēloties šo intervālu secību. Šādā veidā tiek sintezētas vairākas tramvaja jaudas diagrammas, lai varētu aprēķināt summāro jaudas diagrammu jebkādam tramvaju skaitam. Attēls 2.5. rāda piemēru divu tramvaju summārās diagrammas iegūšanai.



2.5. att. Divu tramvaju summārās jaudas diagrammas sintēzes piemērs

Momentāno enerģijas daudzumu, kāds būtu uzkrāts EUS, var iegūt, integrējot summārās jaudas diagrammu. Tas (ar „-” zīmi) parādīts 2.6. att. a) – zaļā raustītā līnijā. Enerģija, kas uzkrāta EUS, un enerģija, kas atdota kontakttīklam, ir parādīta

2.6. att. atbilstoši kā zilais un sarkanais iekrāsotais laukums. Integrēšana tiek pārtraukta, kad uzkrātā enerģija sasniedz „0” (EUS ir iztukšots). Attēls 2.6. b) demonstrē situāciju, kad EUS ir ierobežota jaudas spēja P_{max} , attēls 2.6. c) – kad EUS ir ierobežota enerģijas ietilpība E_{max} , bet attēls 2.6. d) - gan jaudas spēja gan enerģijas ietilpība ir ierobežota. Pēdējā gadījumā aprēķinu procedūra sastāv no četriem soļiem: 1) jaudas diagrammas ierobežošana līdz EUS jaudas spējas līmenim P_{max} ; 2) apcirtās jaudas diagrammas integrēšana, ņemot vērā, ka integrālā vērtība nevar pārsniegt nulles vērtību, kā arī absolūtā vērtība nepārsniedz EUS enerģijas ietilpību; 3) otrajā solī iegūtās EUS enerģijas diagrammas diferencēšana, lai iegūtu saglābtās enerģijas daudzumu (zilais iekrāsotais laukums); 4) vidējās saglābtās jaudas vērtības $P_{av, recoverable}$ noteikšana, vidējojot zilos laukumus pa visu diagrammas laiku.



2.6. att. Jaudas un EUS uzlādes stāvokļa diagrammas ar: neierobežotu EUS jaudas spēju un enerģijas ietilpību (a); ar ierobežotu jaudas spēju P_{max} (b); ar ierobežotu enerģijas ietilpību E_{max} (c); ar ierobežotu gan EUS jaudas spēju P_{max} gan enerģijas ietilpību E_{max} (d)

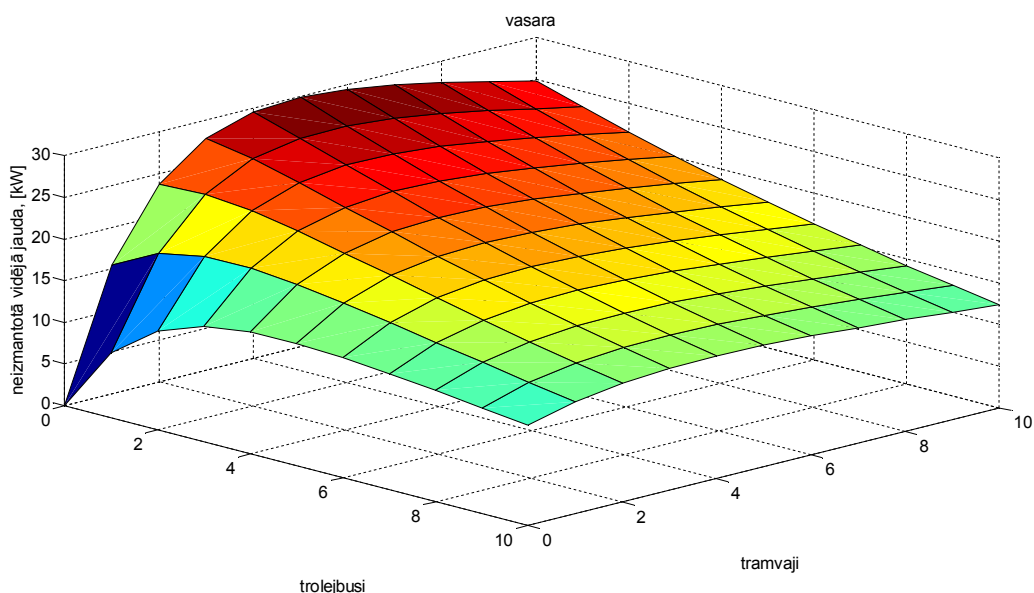
Šādā veidā var tikt aprēķināta vidējā saglābjamā jauda $P_{av, recoverable}(P_{max}; E_{max}; j)$ pie katra tramvaju skaita j . Diennakts saglābjamā enerģija konkrētam P_{max} un E_{max} pārim tiek rēķināta kā:

$$E_{daily, recoverable} = \sum_{j=1}^N P_{av, recoverable}(P_{max}; E_{max}; j) \cdot T_{daily}(j), \quad (2.14)$$

kur N ir apakšstacijas barošanas zonā vienlaicīgi esošo tramvaju maksimālais skaits, $T_{daily}(j)$ ir pēc tramvaja kustības saraksta aprēķinātais ilgums situācijai, kad apakšstacijas barošanas zonā ir j tramvaji.

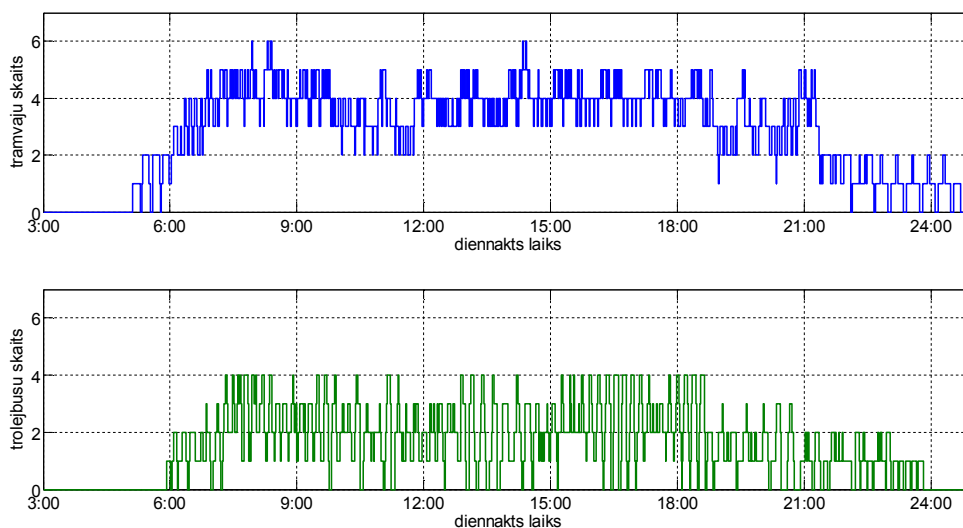
Neizmantotās enerģijas aprēķins 18 Rīgas perifērijas apakšstacijām

Izmantojot transportlīdzekļu jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma vai stohastiskās modelēšanas metodi, tiek iegūta neizmantotā rekuperētā jauda (2.7. att.) atkarībā no tramvaju un trolejbusu skaita.



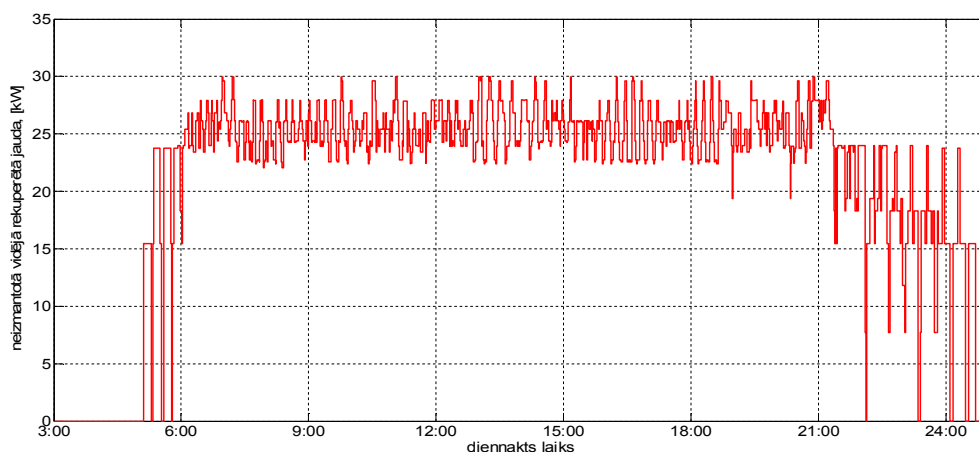
2.7. att. Neizmantotā rekuperētā jauda atkarībā no tramvaju un trolejbusu skaita, kas atrodas vienā apakšstacijas barošanas zonā

Pēc tramvaju/trolejbusu kustības grafika nosaka vienlaicīgi apakšstacijas barošanas apgabalā kursējošo transportlīdzekļu skaitu katrā minūtē (2.8. att.).



2.8. att. 10. apakšstacijas barošanas apgabalā kursējošo tramvaju un trolejbusu skaits darba dienām

Zinot vidējo neizmantoto jaudu katrai tramvaju un trolejbusu skaita kombinācijai (2.7. att.), var iegūt šīs jaudas grafiku diennaktij (2.9. att.).



2.9. att. Nesaglābtā vidējā jauda 10. apakšstacijas barošanas apgabalā darba dienām

Tālāk atliek vien nointegrēt 2.9. att. redzamo jaudas diagrammu, lai iegūtu diennakts laikā 10. apakšstacijas barošanas apgabalā neizmantoātās enerģijas daudzumu. Veicot šādus pat soļus, izmantojot brīvdienu kustības grafikus, kā arī pavasara/rudens un ziemas sezonu neizmantoātās vidējās jaudas diagrammas, tiek iegūts neizmantoātās enerģijas daudzums darba dienām, sestdienām un svētdienām visām sezonām. Pareizinoāt visus iegūtos enerģijas daudzumus ar attiecīgo dienu skaitu gadā un tos saskaitoāt, tiek iegūts enerģijas daudzums, kas netiek izmantots konkrētas apakšstacijas barošanas apgabalā gada laikā.

Aprēķini tika veikti 18 no 34 Rīgas sabiedriskā elektriskā transporta barošanas apakšstacijām; to rezultāti dilstošā enerģijas secībā sakopoti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Neizmantoātās rekuperētās enerģijas aprēķinu rezultāti 2010. gadam

Apakšstacija Nr.	Tramvaju maršruti	Trolejbusu maršruti	E, kWh
10	3; 6	4; 16	118000
5	5; 9	3	113900
8	11	–	101300
16	4; 5	9; 25	98500
7	10	19; 24; 27	93300
30	2; 4	–	82200
12	5; 9	3	74800
13	3; 7; 9	15	66750
22	4	–	64200
27	2	–	62800
11	3; 7; 9	15	58800
17	3; 7; 9	15	57050
20	–	5; 11; 13; 22	54900
29	4	–	46300
33	–	16; 22	45550
32	–	16; 17; 22; 23	42850
18	–	11; 13; 16; 17; 18; 22; 23	40700
23	–	14; 18	38300
Kopā:			1260200

3. SUPERKONDENSATORI

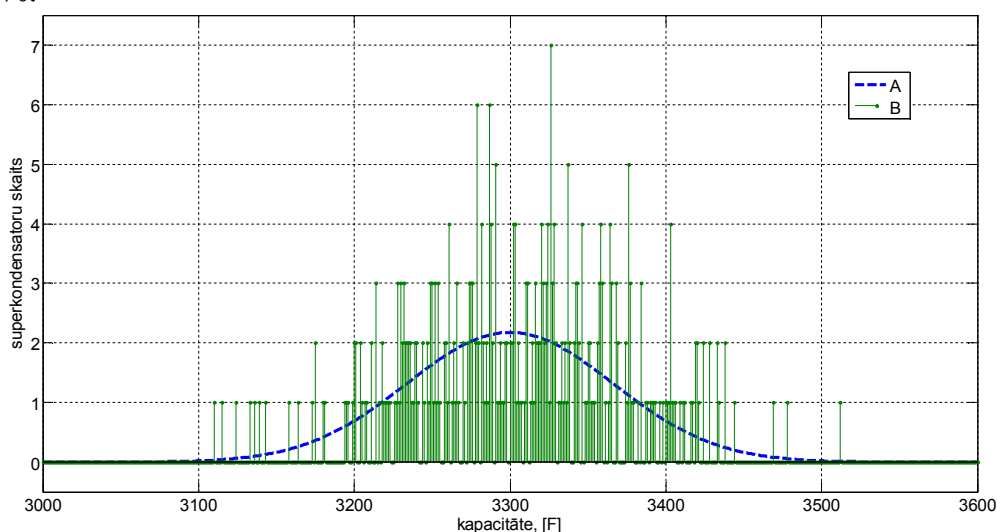
Šajā nodaļā dots superkondensatoru, kā vienas no piemērotākajām enerģijas uzkrājēju tehnoloģijām bremsēšanas enerģijas uzkrāšanai un izmantošanai, apraksts. Īsumā tiek apskatītas superkondensatoru īpašības un ekvivalentās shēmas. Apskatīta spriegumu balansēšanas problēma daudzu virknē slēgtu superkondensatoru izmantošanas gadījumā, kā arī tiek piedāvāts kapacitāšu balansēšanas princips, kā iespējamais risinājums virknē slēgtu kapacitāšu spriegumu disbalansa novēršanai.

Kapacitāšu balansēšana

Šajā darbā sīkāk apskatīts superkondensatoru spriegumu disbalansa novēršanas vai samazināšanas variants, pielietojot kapacitāšu balansēšanas principu [72]. Šo variantu var pielietot, ja enerģijas uzkrājējā ir nepieciešams ne tikai kondensatorus slēgt virknē, bet arī paralēli, lai nodrošinātu nepieciešamo spriegumu un enerģijas ietilpību. Lai varētu izveidot paralēli slēgtu superkondensatoru moduļus, kur šo moduļu kapacitāšu izkliede ir daudz mazāka nekā kondensatoriem atsevišķi, ir nepieciešams nomērīt katra superkondensatora kapacitāti. Līdz ar to, slēdzot virknē moduļus ar niecīgu kapacitāšu starpību, tiek ievērojami samazināta spriegumu disbalansa iespējamība.

Lai pētītu sprieguma disbalansu, ir izmantots piemērs ar tramvajā uzstādāmu EUS, kas satur 2×180 3000F superkondensatorus [61]. Teorētiskai analīzei ir nepieciešams zināt superkondensatoru kapacitāšu izkliedi. Maxwell saviem BCAP3000 kondensatoriem dod tikai kapacitātes izkliedes robežas 0%/+20%, bet sadalījuma funkcija nav pieejama. Atsaucoties uz pētījumu [73], superkondensatoru BCAP0008 (1800F, $\pm 20\%$) kapacitātes ir izkliedētas pēc normālā sadalījuma ar standartdeviāciju $\sigma = 1\%$ no vidējās ($\mu = 1920\text{F}$) vērtības. Līdz ar to tiek pieņemts, ka kapacitātes BCAP3000 arī ir ar normālo sadalījumu ($\sigma = 2\%$, $\mu = 3300\text{F}$).

Lai analizētu sprieguma disbalansa ietekmi uz EUS enerģijas ietilpību, 360 kapacitāšu vērtības, izmantojot MATLAB „randn” funkciju, ir saģenerētas, kā parādīts 3.1. att. Saģenerētajām kapacitātēm vidējā vērtība ir $\mu = 3304\text{F}$ un standartdeviācija $\sigma = 2.05\%$.



3.1. att. A – teorētiskā kapacitāšu sadalījuma līkne, B – patvaļīgi saģenerēto 360 kapacitāšu sadalījums

Teorētiskā enerģijas ietilpība visiem superkondensatoriem var tikt aprēķināta pēc sekojošas izteiksmes un tā ir 1.03kWh.

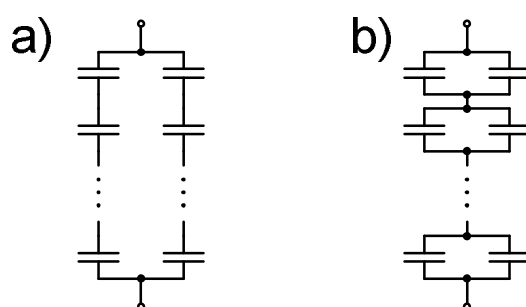
$$W_{ESS} = \sum_{n=1}^{360} \frac{C_n \cdot V_{max}^2}{2} \quad (3.1)$$

kur C_n – n-tā superkondensatora kapacitāte;

V_{max} – superkondensatoru maksimālais spriegums (2.5V).

Reālā enerģijas ietilpība ir mazāka par teorētisko, jo tiklīdz spriegums uz kondensatora ar mazāko kapacitāti sasniedz 2.5V, uzlāde ir jāpārtrauc.

Lai apmierinātu pielietojuma jaudas un enerģijas prasības, superkondensatoru bateriju var izveidot vai kā virknes/paralēlo (3.2. att., a), vai arī paralēlo/virknes slēgumu (3.2. att., b).



3.2. att. Superkondensatoru baterijas slēgums: a) virknes/paralēlais, b) paralēlais/virknes

Iepriekš saģenerētās 360 kapacitātes patvaļīgi saslēdzot virknes/paralēlajā vai paralēlajā/virknes slēgumā, iegūstam, ka efektīvā enerģijas ietilpība superkondensatoru baterijai ir mazāka par teorētiskajām 1.03kWh.

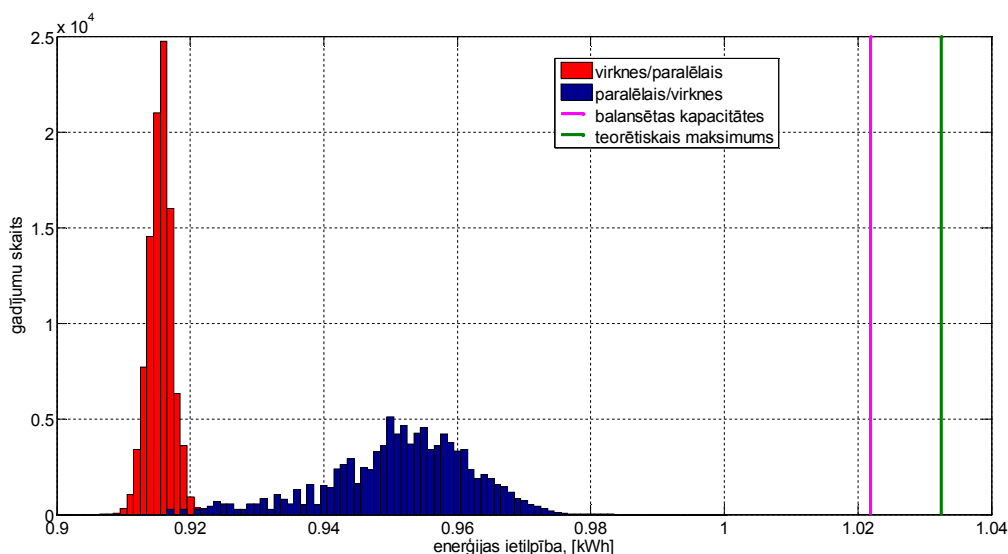
Lai novērtētu patvaļīgā slēguma ietekmi uz superkondensatoru baterijas enerģijas ietilpību, 360 kondensatori (3.1. att., b) patvaļīgi tika sakārtoti 100000 reizes gan virknes/paralēlajā gan paralēlajā/virknes slēgumā. Tika iegūts rezultāts, ka superkondensatoru baterijas enerģijas ietilpība virknes/paralēlajā slēgumā var atrasties robežās no 0.905kWh līdz 0.925kWh, savukārt paralēlajā/virknes slēgumā no 0.915kWh līdz 0.985kWh (3.3. att.).

Slēdzot superkondensatorus paralēlajā/virknes slēgumā, teorētiski standartdeviācija šīm virknē slēgto moduļu kapacitātēm salīdzinājumā ar standartdeviāciju superkondensatora kapacitātēm ir samazināta $\sqrt{2}$ reizes. Paralēlais/virknes slēgums vidēji nodrošina lielāku efektīvo enerģijas ietilpību, salīdzinājumā ar virknes/paralēlo slēgumu. Tomēr arī mazāka enerģijas ietilpība var gadīties. Tāpēc, lai maksimizētu efektīvo enerģijas ietilpību, ir nepieciešams atrast optimālo sakārtojuma kombināciju superkondensatoru slēgumam.

Vienkāršs veids, kā panākt labāko sakārtojumu lielākajā daļā gadījumu, ir likt pārī superkondensatoru ar lielāko kapacitāti kopā ar superkondensatoru ar mazāko kapacitāti, tad otru lielāko kopā ar otru mazāko utt. Ja superkondensatoru kapacitātes būtu simetriski sadalītas, tad būtu iespējams sapārot kondensatorus tā, ka virknē slēgto moduļu kapacitātes būtu vienādas un kopējā efektīvā enerģijas ietilpība sasniegtu 100%. Šāda kondensatoru sapārošana tad arī tiek saukta par kapacitāšu balansēšanu.

Attēlā 3.3. parādīts, ka kapacitāšu balansēšana ievērojami palielina superkondensatoru baterijas efektīvo enerģijas ietilpību. Ja superkondensatoru efektīvā

enerģijas ietilpība patvaļīgā virknes/paralēlā slēgumā vidēji ir 89% un patvaļīgā paralēlā/virknes slēgumā 92%, tad pielietojot kapacitāšu balansēšanu, var iegūt 99%.



3.3. att. Virknes/paralēlā, paralēlā/virknes un kapacitāšu balansēšanas metodes salīdzinājums

Līdz ar to var secināt, ka 1) superkondensatoru kapacitāšu balansēšana paralēlajā/virknes slēgumā ievērojami palielina superkondensatoru baterijas efektīvo enerģijas ietilpību; 2) kapacitāšu balansēšanai ir nepieciešama superkondensatoru kapacitāšu mērīšana, kas visiem kondensatoriem veikta vienādos apstākļos; 3) ekspluatācijas laikā superkondensatoru parametru degradēšanās dēļ būtu nepieciešams veikt ilgstošus pētījumus, izmantojot lielu skaitu superkondensatoru.

4. REKUPERĒTĀS ENERĢIJAS IZMANTOŠANA

Šajā nodaļā dots apskats neizmantotās rekuperētās enerģijas izmantošanas trīs variantiem. Šie varianti ir: 1) apakšstaciju pārbūve, lai nodrošinātu divvirzienu jaudas plūsmu; 2) enerģijas uzkrājēju uzstādīšana transportlīdzekļos; 3) stacionāru enerģijas uzkrājēju izmantošana. Šajā nodaļā piedāvāts autonomas darbības enerģijas uzkrājējsistēmas PSIM modelis, kas būtu piemērots, piemēram, uzstādīšanai tramvajā T3A, dots spēka shēmas un vadības sistēmas apraksts, un simulēšanas rezultātu analīze. Apskatīti arī ar transportlīdzekļa vadību saistītu enerģijas uzkrājējsistēmu (EUS) simulēšanas modeļi. Sniegts vadības sistēmu un transportlīdzekļu modeļu darbības apraksts un simulēšanas rezultāti. Simulēšanas ātruma palielināšanai izveidots EUS spēka pārveidotāja nepārtrauktais modelis un dots tā apraksts. Analizētas un pētītas dažādas teorētiskas EUS vadības stratēģijas un pētīta to ietekme uz kopējo enerģijas patēriņu no apakšstacijas.

Pielietojot stohastiskās modelēšanas metodiku, iegūta sakarība, kā no apakšstacijā uzstādītas EUS enerģijas ietilpības un jaudas spējas ir atkarīgs saglābjamās enerģijas daudzums.

Apakšstaciju aprīkošana ar reversīvajiem taisngriežiem

Barošanas apakšstacijas ar nereversīvajiem diožu taisngriežiem ir mantojums no elektriskā transporta ieviešanas ēras, kad transportlīdzeklis bija tikai enerģijas patērētājs. Apakšstaciju pārbūves, t.i. aprīkošanas iespējas ar reversīviem taisngriežiem, ir pētītas vairākos Rīgas Tehniskās universitātes darbos [4], [5], [76]. Šim risinājumam ir vairāki trūkumi:

- taisngrieža-invertora agregātu uzstādīšana apakšstacijā salīdzinājumā ar parasto vilces apakšstacijas elektroiekārtu praktiski dubulto tās cenu;
- vienkāršākajiem, ar tīklu komutējamiem tiristoru invertoriem, ir zems jaudas koeficients un kroplota tīkla strāva, kā arī pazemināts darba drošums;
- jānodrošina kontakttīkla rezerves barošana apakšstacijas pārbūves laikā;
- taisngrieža-invertora agregāta atteikums rada energoapgādes pārtraukumu;
- netiek nodrošināta maksimālās jaudas nolīdzināšana; pretvirziena enerģijas plūsmas dēļ jaudas svārstības barošanas tīklā ir lielākas nekā nereversīvo taisngriežu apakšstacijām;
- daļa enerģijas tiek zaudēta lielā enerģijas pārvades attāluma dēļ.

Minēto trūkumu dēļ nereversīvo apakšstaciju pārbūve uz reversīvajām nevar konkurēt ar pārējiem diviem variantiem. Vēl jo vairāk, pasaulē ir vērojama tendence aprīkot ar enerģijas uzkrājējiem arī reversīvās apakšstacijas, lai uzlabotu to enerģētiskos rādītājus [6], [77].

Enerģijas uzkrājēju uzstādīšana transportlīdzekļos

Uzstādot enerģijas uzkrājēju transportlīdzeklī, rekuperatīvā bremzēšanas enerģija tiek izmantota visefektīvāk. Šim risinājumam ir sekojošas priekšrocības:

- vismazākie enerģijas zudumi;
- samazinātas kontakttīkla sprieguma svārstības, sevišķi no apakšstacijas attālinātajos posmos;
- iespēja veikt nelielus attālumus autonomi bez kontakttīkla barošanas sprieguma.

Diemžēl šis risinājums ir arī visdārgākais un, vietas trūkuma dēļ, grūti realizējams jau ekspluatācijā esošajos transportlīdzekļos. Transportlīdzekļiem, kuriem atlikušais kalpošanas laiks ir mazāks par desmit gadiem, ietaupītā enerģija praktiski nevar nosegt ieguldītos līdzekļus. Rīgā enerģijas uzkrājēju uzstādīšanai ir piemēroti trolejbusi Škoda 24TR, kuros nav uzstādīti dīzeļģeneratori.

Enerģijas uzkrājēju uzstādīšana barošanas apakšstacijās

Šis risinājums ir alternatīva iepriekšējam. Salīdzinājumā ar divvirzienu enerģijas plūsmas apakšstacijām tam ir vairākas priekšrocības:

- samazinātas jaudas svārstības maiņstrāvas barošanas tīklā; enerģijas uzkrājējs var strādāt arī kā maksimālās jaudas ierobežotājs;
- mazāki enerģijas zudumi;
- tas samazina sprieguma svārstības līdzstrāvas kontakttīklā un līdz ar to uzlabo transportlīdzekļu vilces un palīgiekārtu enerģētiskos rādītājus;
- enerģijas uzkrājēja atteikums nerada barošanas pārtraukumus kontakttīklā.

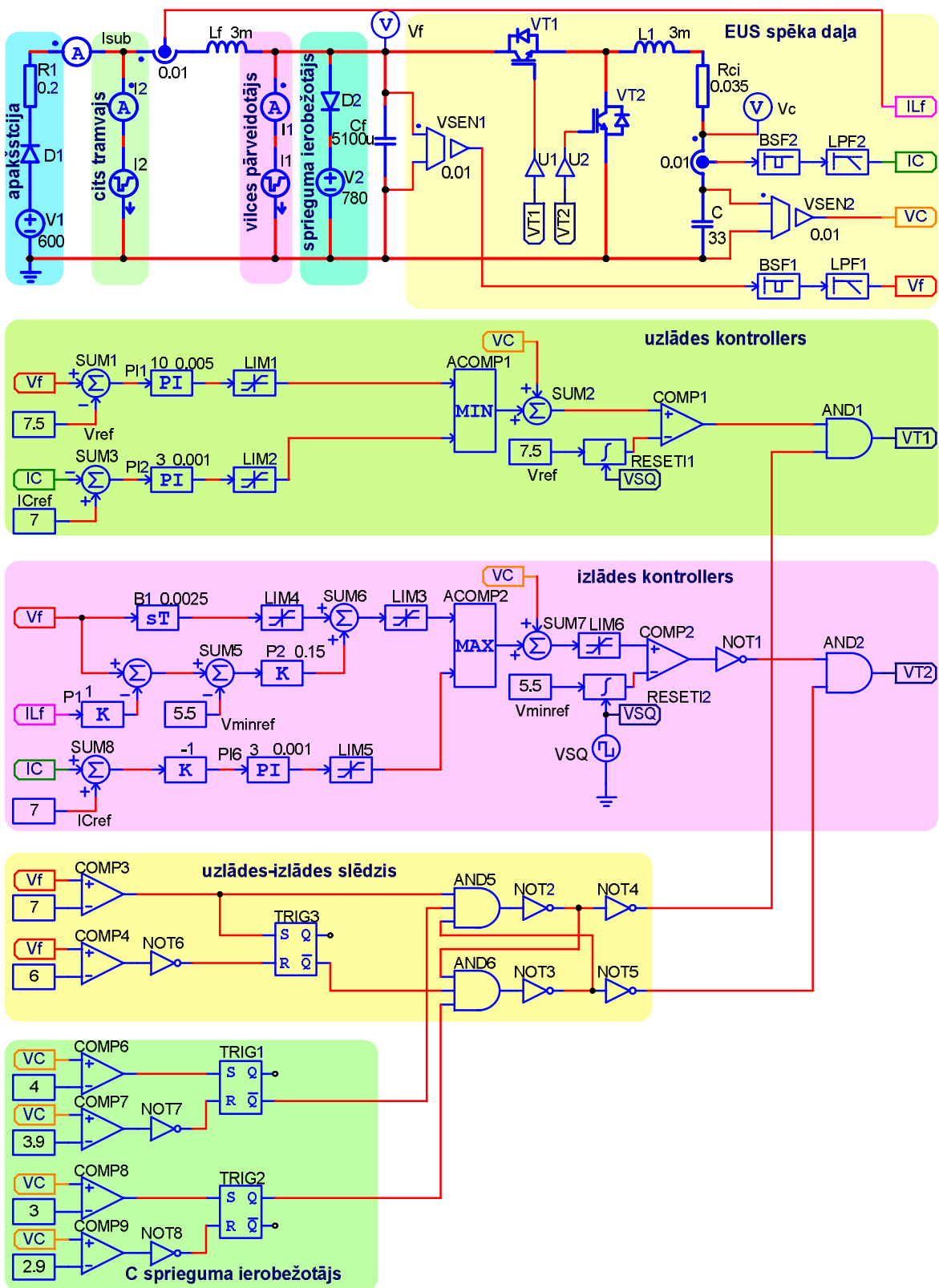
Savukārt, salīdzinājumā ar enerģijas uzkrājēja uzstādīšanu transportlīdzekļos, stacionārajam variantam ir šādas priekšrocības:

- labāki ekspluatācijas apstākļi, līdz ar to vienkāršāka un lētāka konstrukcija;
- enerģijas uzkrājēja izdalīto siltumu rudens, ziemas un pavasara mēnešos var lietderīgi izmantot apakšstaciju apsildei;
- augstāks enerģijas uzkrājēju izmantošanas koeficients, līdz ar to mazāks to kopējais skaits un izmaksas, kā arī īsāks atmaksāšanās laiks.

Autonomas darbības enerģijas uzkrājēja uzstādīšana transportlīdzeklī

Uzstādot enerģijas uzkrājējus ekspluatācijā esošajos transportlīdzekļos ne vienmēr ir iespējama piekļuve transportlīdzekļa vadības signāliem, kā arī dažreiz tā var būt nevēlama. Tāpēc, kā viens no darba uzdevumiem bija autonomas darbības enerģijas uzkrājēja izstrāde, kas darbotos kā neatkarīgs funkcionāls mezgls, izmantojot pēc iespējas vienkāršākus tehniskos risinājumus un savus strāvu un spriegumu sensorus. Kā tipisks šāda transportlīdzekļa piemērs tika izvēlēts tramvajs T3A, kuram nav ātruma devēja, vadības iekārta veidota uz mikroprocesoru bāzes, galvenie tramvaja vadības signāli eksistē tikai digitālā formā un ārēja piekļuve tiem nav iespējama. Šī uzdevuma izpildei tika izvēlēts vienpakāpes impulsu pārveidotājs bez līdzsprieguma starpposma [78]. Ar EUS aprīkota tramvaja darbība tika pārbaudīta, izmantojot PSIM un MATLAB/SIMULINK vidēs izveidotus sistēmas modeļus, un simulējot tos dažādās situācijās, kur tramvajs uzsāk gaitu, bremzē, ar un bez cita tramvaja tajā pašā kontakttīkla posmā, kā arī situācijā, kad tramvajs darbojas autonomā režīmā bez kontakttīkla.

Tramvaja T3A vilces piedziņas un borta EUS PSIM modelis redzams 4.1. att.



4.1. att. Tramvajā T3A uzstādītā EUS PSIM modelis

EUS vadības sistēma

EUS vadības sistēma (4.1. att.) satur superkondensatoru uzlādes kontrolleru, izlādes kontrolleru, uzlādes-izlādes režīma slēdzi un superkondensatoru baterijas sprieguma ierobežotāju.

Galvenais EUS vadības sistēmas uzdevums ir uzkrāt visu tramvaja bremsēšanas enerģiju, nepieļaujot tās izkliedēšanos bremsu reostatā. Lai uzkrātu enerģiju, kondensatoram bremsēšanas sākumā jābūt izlādētam līdz spriegumam V_{Cmin} . Tā kā bremsēšanas enerģija atkarīga no tramvaja ātruma, tad uzlādes-izlādes process varētu tikt kontrolēts pēc tramvaja reālā ātruma. Diemžēl šāds vadības algoritms neesošā ātruma devēja dēļ nevar tikt pielietots T3A tramvajā.

EUS vadībai tiek mērīts filtra kondensatora spriegums V_f , superkondensatoru baterijas spriegums v_c un strāva i_c un tramvaja ieejas filtra strāva i_{lf} . Tā kā filtra kondensatora spriegumam v_f un superkondensatoru baterijas strāvai i_c ir 1000Hz pulsācija ar ievērojamu amplitūdu, tāpēc mērītie signāli tiek filtrēti ar 1000Hz frekvences aiztures filtriem BSF1, BSF2 un zemo frekvenču filtriem LPF1, LPF2 ar nogriešanas frekvenci 800Hz.

Viens no simulēšanas uzdevumiem ir noteikt optimālo energoietilpību, kas atkarīga no virknē un paralēli slēgto superkondensatoru skaita. Tomēr virknē slēgto kondensatoru skaitu ierobežo maksimāli pieļaujama spriegums 450V (vienāds ar minimālo kontakttīkla spriegumu).

Vadības sistēmas parametru optimizācija

Primārais PSIM simulēšanas mērķis bija atrast optimālo EUS vadības sistēmas struktūru un optimizēt tās atgriezenisko saišu parametrus tā, lai sasniegtu stabilu darbību un pārejas procesus bez pārregulējuma un svārstībām.

PI kontrolleru parametri tika optimizēti veicot iteratīvu EUS simulēšanu dažādos režīmos, pielietojot PSIM „parameter sweep” funkciju. Pie izvēlēta PI kontrollera proporcionālā koeficienta tiek mainīta laika konstante. Pēc tam tiek izvēlēta laika konstante, kas dod vislabāko pārejas procesu, pie šīs konstantes tiek mainīts proporcionālais koeficients. Pēc vairākām iterācijām tiek atrasta labākā proporcionālā koeficienta un laika konstantes kombinācija. Optimālās vadības sistēmas parametru vērtības ir parādītas 4.1. att.

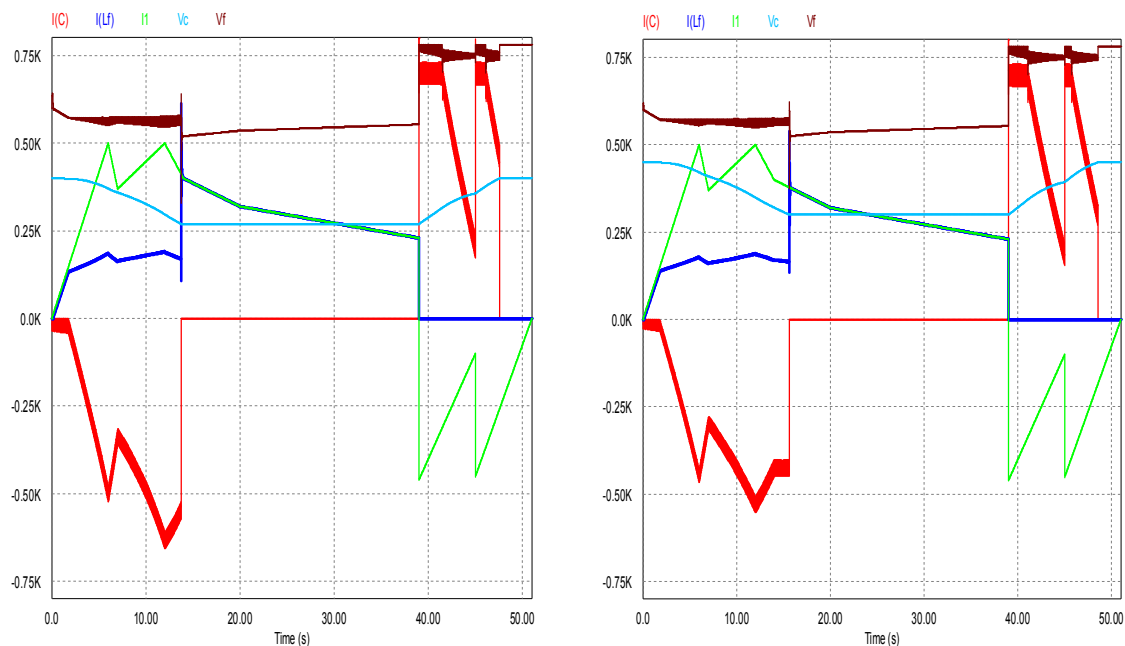
EUS darba režīmu simulēšana

PSIM/SIMULINK simulācijas tika veiktas tramvaja gaitas un bremsēšanas procesu dažādām situācijām, ar un bez otra tramvaja tajā pašā kontakttīkla posmā.

PSIM simulēšanas rezultāti vienam tramvajam pie divām EUS superkondensatoru baterijas kapacitātēm (37.5F un 33.3F) ir parādīti 4.2. att., a, b. Kapacitāte 33.3F spēj uzņemt vairāk enerģijas pateicoties maksimālajam un minimālajam sprieguma iestatījumam, kas ļauj vairāk enerģijas uzkrāt bremsēšanas sākumā. Savukārt, tas nozīmē, ka īsāku laiku notiek strāvas ierobežošana, kad reģenerētā enerģija daļēji tiek izkliedēta bremsēšanas reostatā. Jaudas galotņu apcirpšanas laiks (laiks, kamēr superkondensatori tiek izlādēti līdz minimālajam iestatītajam spriegumam) pie 33.3F superkondensatoru baterijas ir palielināts līdz 15.59s salīdzinājumā ar 13.72s pie 37.5F EUS kapacitātes. Kopējais laiks, kad darbojas strāvas ierobežošana uz 700A, ir 4s 37.5F EUS un 3s 33.3F EUS. Turpmākajām simulēšanām ir izvēlēta 33.3F kapacitāte.

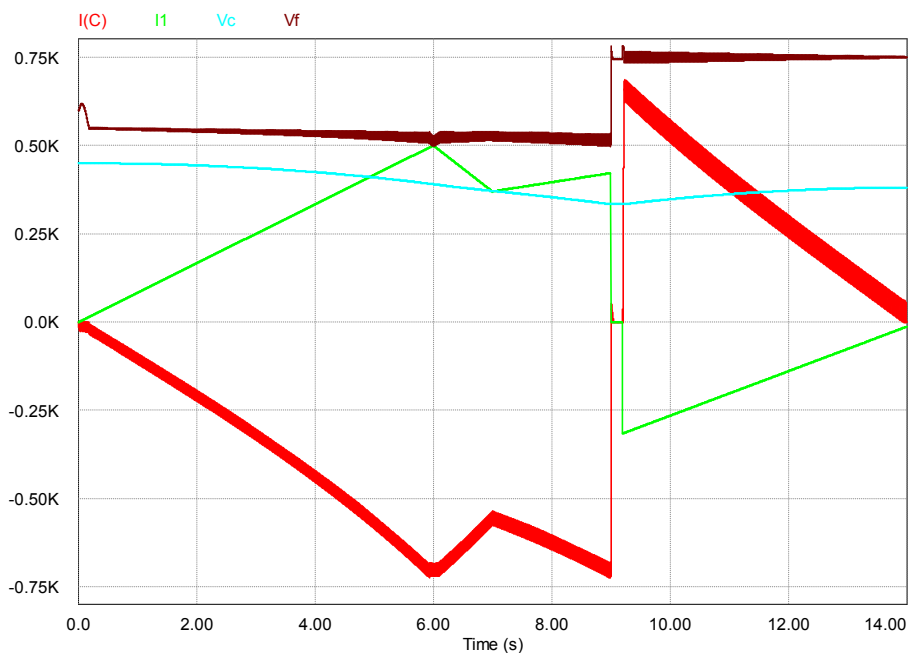
a)

b)



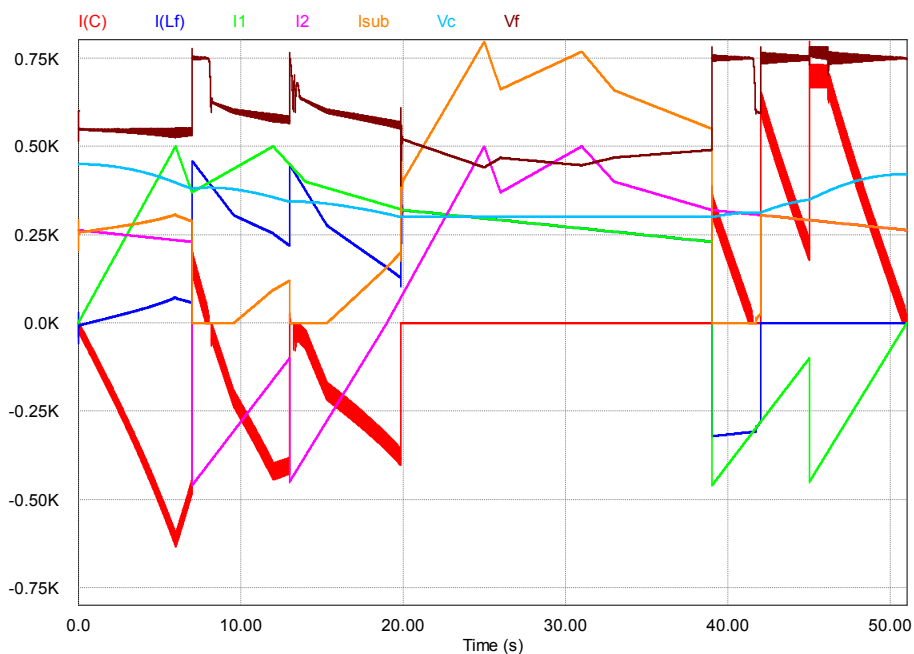
4.2. att. PSIM simulēšanas rezultāti viena tramvaja gadījumā pie divām superkondensatoru baterijas kapacitātēm: a) 37.5F, b) 33.3F

Tramvaja autonomas darbības simulācijas rezultāti parādīti 4.3. att. Ierobežotas EUS enerģijas ietilpības dēļ tramvaja vilce autonomā režīmā ar maksimālo strāvu ir iespējama tika pirmās 9s, kad superkondensatoru baterijas spriegums nokrīt tuvu pie apakšējās robežas, un filtra kondensatora spriegums samazinās līdz 500V. Tas atbilst tramvajam, kas ieskrienas līdz 27km/h.



4.3. att. Tramvaja autonomās darbības PSIM simulēšanas rezultāti

Simulācijas tika veiktas arī gadījumiem, kas imitē kontakttīkla bojājumus dažādās tramvaju kustības fāzēs. Attēlā 4.4. redzams gadījums, kad kontakttīkla spriegums pazūd 42. sekundē, kad tramvajs bremzē pie maksimālā ātruma. Redzams, ka tas nenojauc normālu tramvaja darbības režīmu.

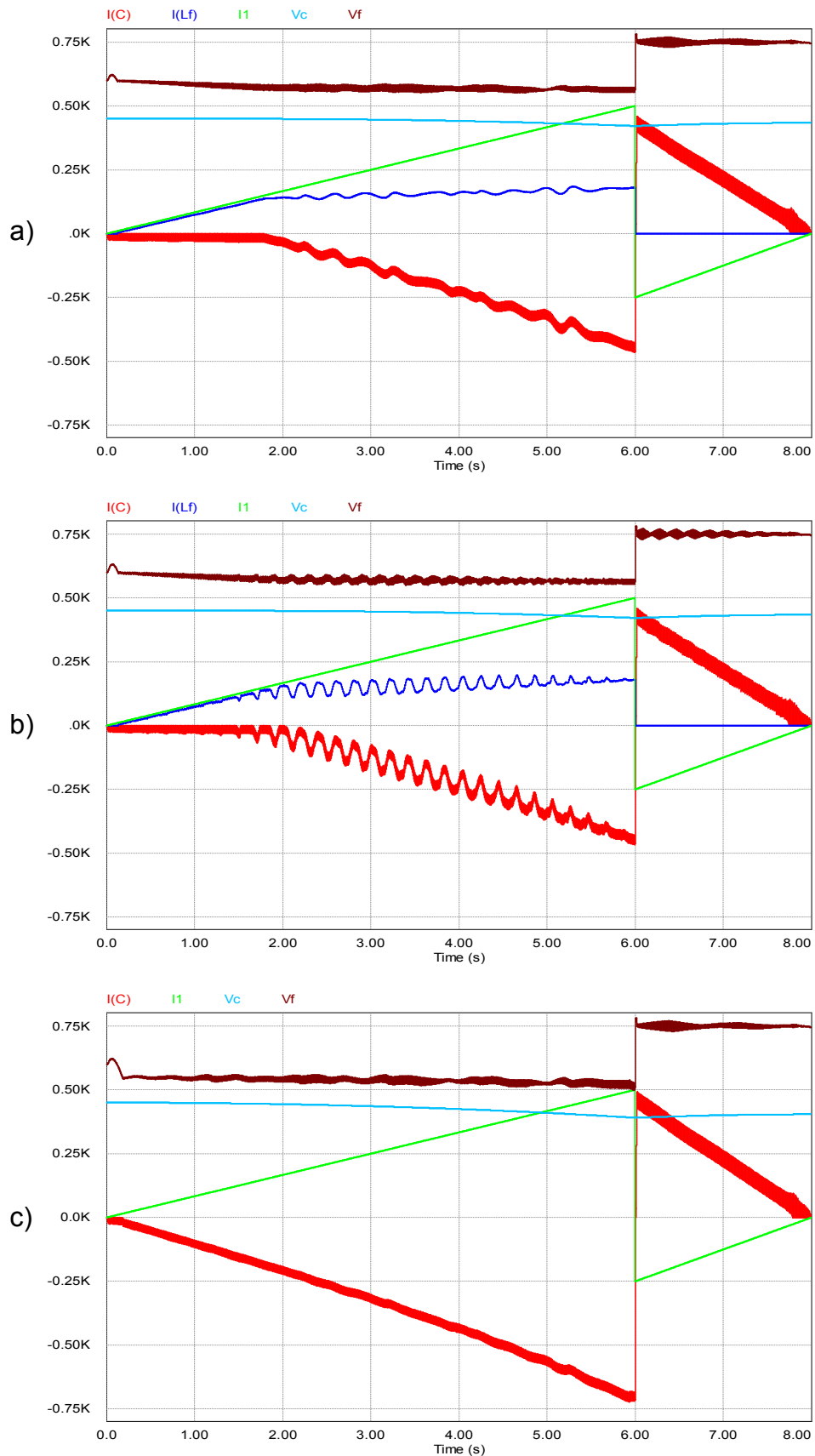


4.4. Kontakttīkla sprieguma pazušanas simulēšana tramvaja bremsēšanas laikā (42. s)

Izmantojot tramvaja līdzstrāvas IPM impulsveida strāvas PSIM modeli, ir pētīta EUS vadības sistēmas stabilitāte gan sinhronā, gan asinhronā tramvaja vilces pārveidotāja un EUS strāvas regulatora darbības režīmā. Iepriekšējā nodaļā simulēšanas ātrdarbības nodrošināšanai tramvaja spēka shēma tika aizstāta ar lineāru strāvas avotu. Savukārt, reālā situācijā šāds līdzstrāvas pārveidotājs ģenerē strāvas impulsus ar frekvenci 1000Hz un gandrīz konstantu amplitūdu, bet mainīgu platumu. Filtra kondensators C_f ir kopējs abiem, gan tramvaja, gan EUS pārveidotājiem. Tā kā C_f kapacitāte ir salīdzinoši maza ($5100\mu\text{F}$), tad strāvas impulsi izraisa ievērojamas kondensatora sprieguma pulsācijas, kuras savukārt var ietekmēt EUS darbību. PSIM simulāciju mērķis bija:

- izpētīt, kā abu pārveidotāju mijiedarbība ietekmē EUS sprieguma regulēšanas saiti;
- optimizēt vadības saišu PID parametrus;
- noteikt, vai nepieciešams sinhronizēt abu pārveidotāju darbību.

Situācija asinhronajam darba režīmam ar 1Hz (a) un 5Hz (b) atšķirību abu pārveidotāju komutācijas frekvencēm redzama 4.5. att. Attēls 4.5. c demonstrē autonomo vilci ar 1Hz frekvenču starpību. Spriegumu V_f un strāvu I_C līniju biezums 4.5. att. atbilst to pulsāciju amplitūdai.



4.5. att. Asinhronais darba režīms ar 1Hz (a) un 5Hz (b), un autonomais režīms ar 1Hz (c) atšķirību komutācijas frekvencēm

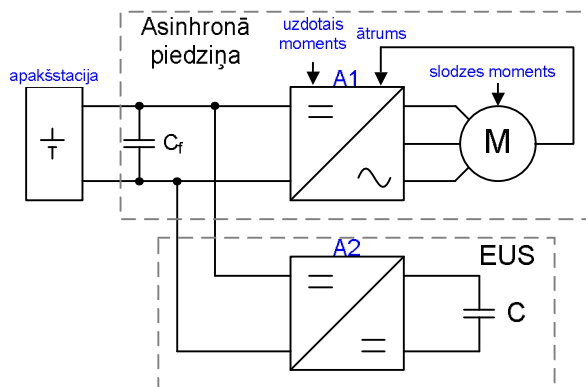
Salīdzinot rezultātus, kas iegūti simulācijās ar impulsveida un nepārtraukto strāvas avotu, var secināt, ka:

1. Uzstādot superkondensatoru EUS, piemēram, tramvajā T3A, iespējams efektīvi uzkrāt bremzēšanas enerģiju neatkarīgi no pārējiem pie kontakttīkla pieslēgtajiem patērētājiem.
2. Pilnīga bremzēšanas enerģijas uzkrāšana tiek panākta, ja EUS vadības sistēmā tiek ieviesta atgriezeniskā saite pēc filtra kondensatora sprieguma. Lai ierobežotu superkondensatoru strāvu pieļaujamās robežās, papildus arī ir nepieciešama vadības saite pēc strāvas.
3. Atšķirības darbībā starp sinhrono un asinhrono pārveidotāja darba režīmu ir nebūtiskas, ja komutācijas frekvenču starpība tramvaja līdzstrāvas vilces pārveidotājam un EUS pārveidotājam nepārsniedz 1Hz. Šādu precizitāti ir viegli nodrošināt, ja komutācijas frekvence ir kvarca stabilizēta; tas nozīmē, ka frekvenču sinhronizēšana nav nepieciešama.
4. EUS un tramvaja vilces pārveidotāju vadības sistēmu neatkarīga darbība ir iespējama, tomēr tā sarežģī EUS vadības sistēmas darbības algoritmu, kas savukārt samazina tā stabilitātes robežu.
5. Lai uzlabotu ar EUS aprīkota tramvaja darbību, rekomendējoši ir aprīkot EUS vadības sistēmu ar ātruma devēju. Izstrādājot jaunus transportlīdzekļus, kas aprīkoti ar EUS, to vadības sistēmām jābūt sinhronām un saistītām.

Ar transportlīdzekļa vadību saistītas EUS

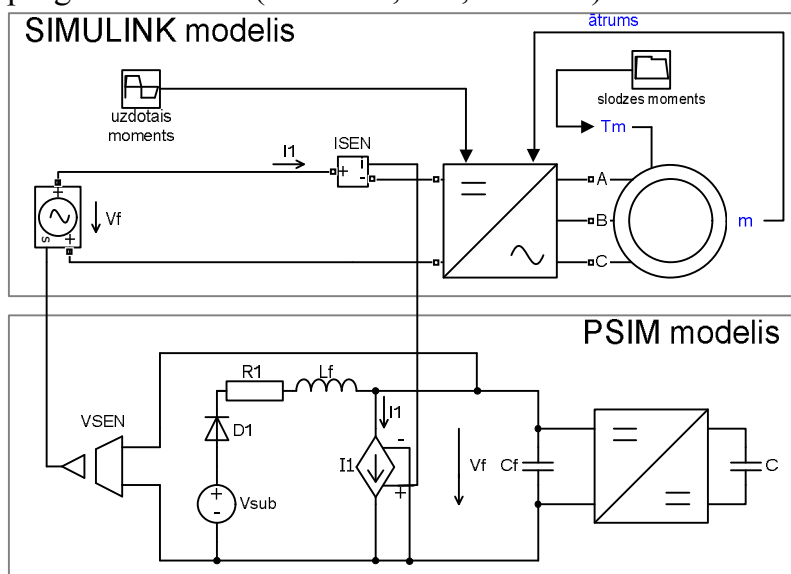
Izstrādājot jaunu tramvaju vai trolejbusu, pašsaprotami ir veidot EUS saistītu ar transportlīdzekļa vadības sistēmu, tādējādi paverot plašas iespējas realizēt dažādas EUS vadības stratēģijas. Tāpēc šajā darbā izstrādāti arī ar transportlīdzekļa vadību saistītu EUS simulēšanas modeļi gan tramvajam ar līdzstrāvas piedziņu, gan asinhronās piedziņas trolejbusam.

Barojošās apakšstacijas un tramvaja, kas aprīkots ar EUS, SIMULINK modelis parādīts 4.6. att.



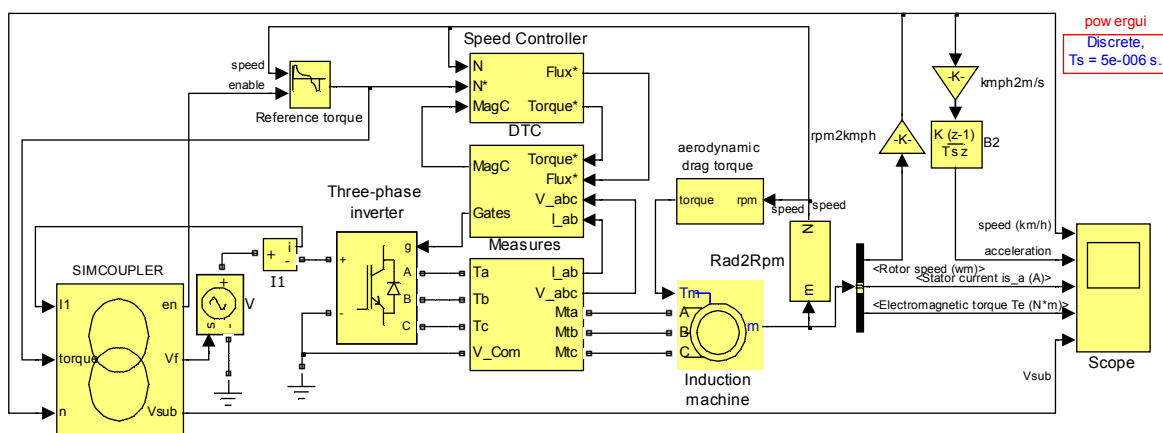
4.7. att. Trolejbusa asinhronās piedziņas ar superkondensatoru EUS spēka shēma

Trolejbusa vilces pārveidotājs ir simulēts, izmantojot SIMULINK tiešo momenta regulēšanas (DTC) piedziņas modeli, savukārt superkondensatoru EUS simulēšanas modelis izveidots PSIM vidē. Abi modeļi tiek sajūgti, izmantojot PSIM „SimCoupler” programmas rīku (skat. 4.8., 4.9., 4.10. att.).



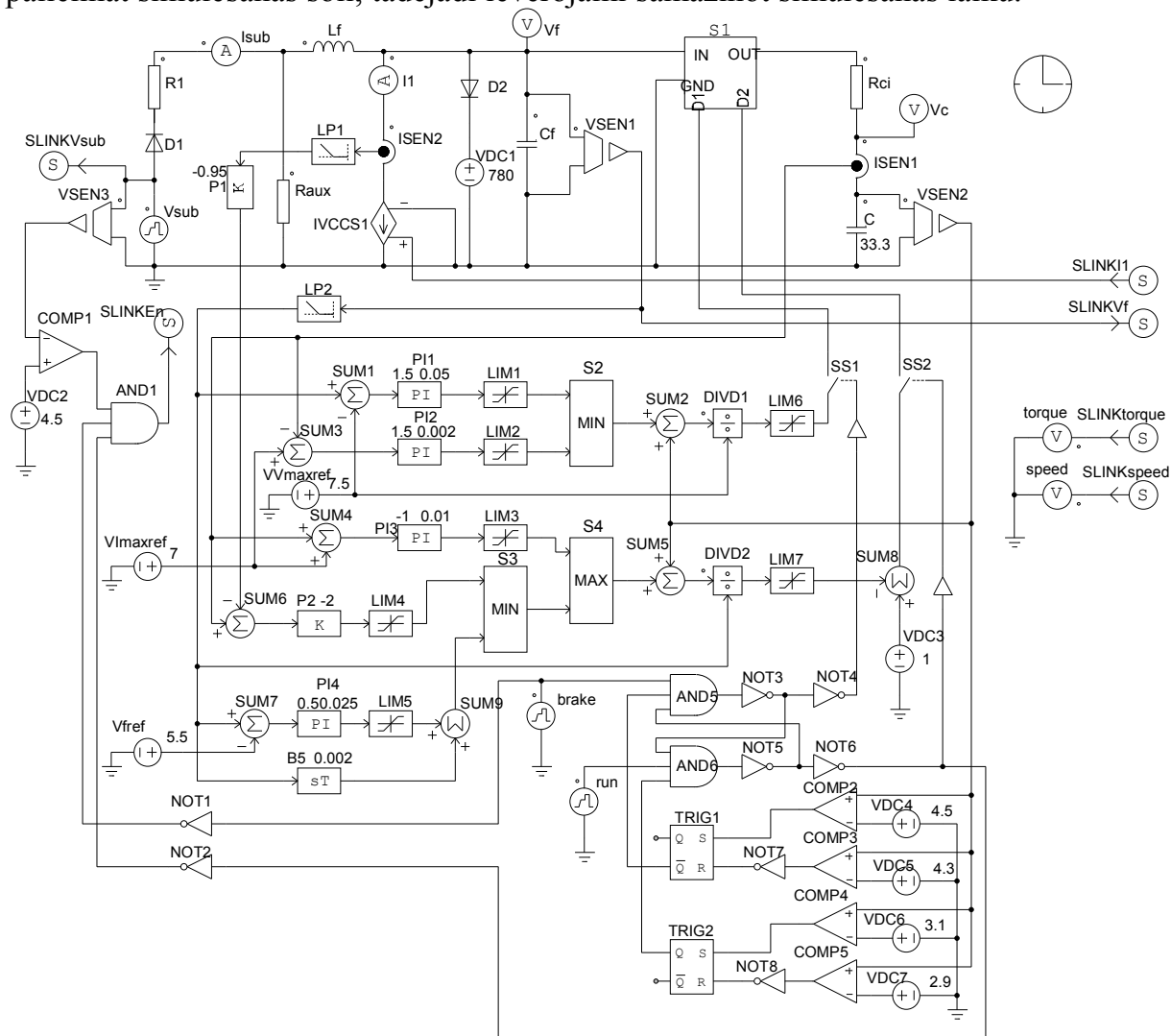
4.8. att. SIMULINK asinhronās piedziņas un PSIM EUS modeļu sajūgšana

Trolejbusa asinhronās vilces piedziņas SIMULINK modelis ir izveidots, kā parādīts 4.9. att.



4.9. att. Asinhronās piedziņas SIMULINK modelis

Enerģijas uzkrājējsistēmas PSIM modelis parādīts 4.10. att. Impulsveida buck&boost pārveidotāja modelis ir aizstāts ar nepārtraukto modeli S1[81], kas ļauj palielināt simulēšanas soli, tādējādi ievērojami samazinot simulēšanas laiku.



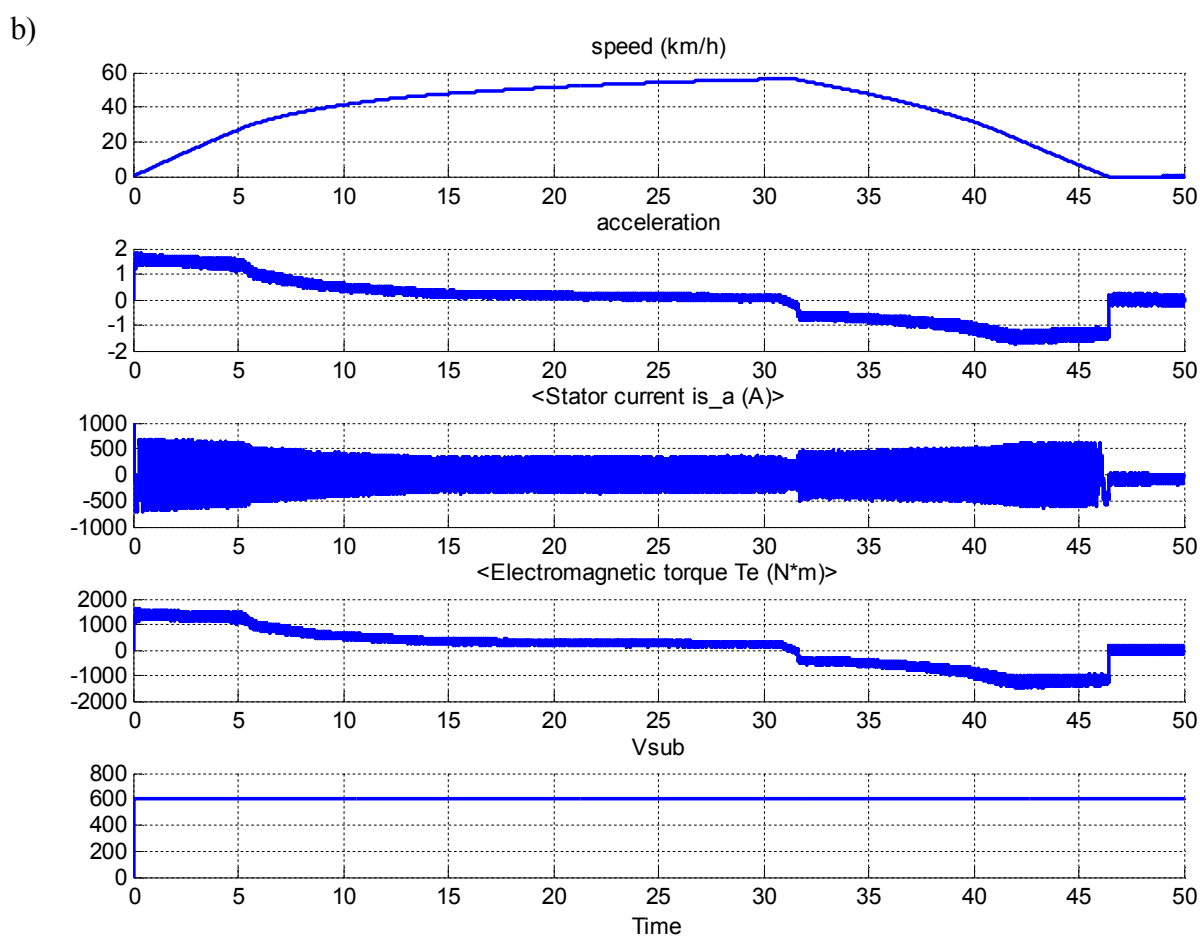
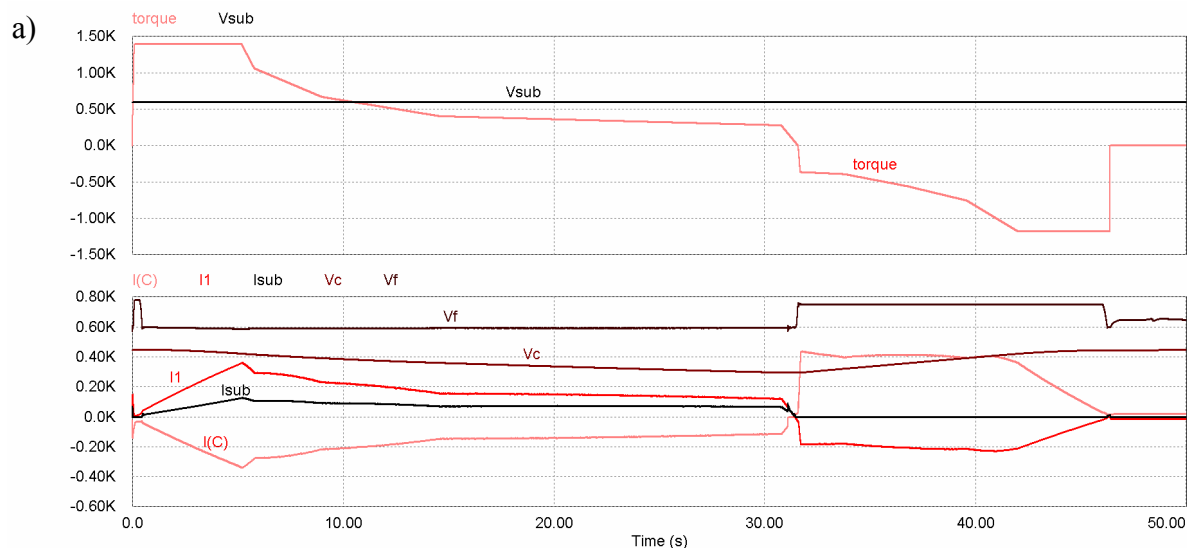
4.10. att. Enerģijas uzkrājēja PSIM modelis

Simulēšanas rezultāti

PSIM-SIMULINK simulēšana tika veikta viena trolejbusa gaitas un bremsēšanas režīmiem gan barojoties no kontakttīkla, gan autonomajā vilces režīmā. Tika simulēti sekojoši varianti:

- barošana no kontakttīkla (4.11. att.);
- autonomā vilce, kad kontakttīkla barošana nav pieejama;
- sprieguma pazušana;
- īslaicīga sprieguma pazušana.

Kā piemērs 4.11. att. parādītas simulēšanas diagrammas, kas iegūtas pie normāla kontakttīkla sprieguma.



4.11. att. Trolejbusa modeļa, kas barojas no kontakttīkla, simulēšanas rezultāti a) PSIM daļai,
b) SIMULINK daļai

Secinājumi

Kā rāda simulēšanas rezultāti, EUS vadības sistēma nodrošina stabilu darbību visos darba režīmos, kā arī demonstrē efektīvu trolejbusa bremsēšanas enerģijas uzkrāšanu un izmantošanu.

Nepārtrauktā buck&boost modeļa pieļaujamais simulēšanas solis ir atkarīgs no pārveidotāja vadības sistēmas dinamiskajiem parametriem un no pārejas procesa diagrammu pieļaujamās neprecizitātes. Pārāk liels simulēšanas solis var izsaukt sistēmas svārstības.

Nepārtrauktā modeļa izmantošana demonstrē iespēju samazināt sistēmas simulēšanas laiku 6 reizes, salīdzinājumā ar impulsveida modeli, kura komutācijas frekvence ir 1000Hz.

EUS vadības stratēģijas

Šajā darbā tika pētītas vairākas transportlīdzeklī uzstādāma EUS vadības stratēģijas, kuras varētu saukt kā „vidējā”, „vidējā ar paredzēšanu”, „proporcionālā” un „galotņu apcirpšanas” vadības stratēģija. No apakšstacijas patērēto enerģiju noteicām, izmantojot tramvaja ar EUS matemātisko MATLAB/SIMULINK modeli, kuram, kā ieejas datus devām tramvaja vienas dienas jaudas diagrammu, kas tika reģistrēta 6. maršruta tramvajā.

Tabulā 4.1. attēlota reģistrētās jaudas diagrammas enerģijas bilance. Enerģijas zudumi bremžu reostatos tiek aprēķināti integrējot jaudas diagrammas negatīvo apgabalu.

4.1. tabula

Enerģijas sadalījums

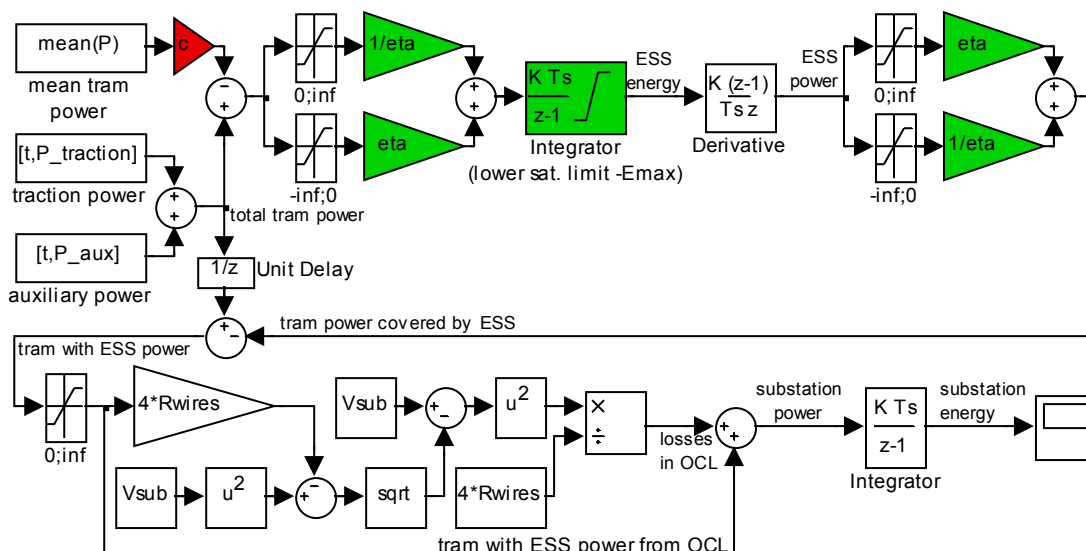
	Enerģija, kWh	Attiecinātā enerģija,%
No kontakttīkla patērētā enerģija	1158.6kWh	93.9%
Kontakttīklā atgrieztā enerģija	0kWh	0%
Bremžu reostatos izkliedētā enerģija	230.1kWh	18.7%
Enerģijas zudumi kontakttīklā	75kWh	6.1%
Kopējais enerģijas patēriņš no apakšstacijas	1233.6kWh	100%
Kopējie enerģijas zudumi	305.1kWh	24.8%
Enerģijas daudzums, ko teorētiski iespējams ietaupīt	294.3kWh	23.9%

Teorētiskais maksimums enerģijas daudzumam, ko būtu iespējams ietaupīt, tiek aprēķināts gadījumā, kad tramvajs no kontakttīkla tērē konstantu jaudu, kas vienāda ar tā vidējo jaudu (48.2kW), savukārt mainīgā jaudas daļa tiek nodrošināta ar EUS palīdzību. Šajā gadījumā zudumiem vados ir minimālā vērtība, kas sastāda 0.9% no kopējā enerģijas daudzuma patērētā no apakšstacijas, t.i., zudumus vados varētu samazināt no 6.1% līdz 0.9%.

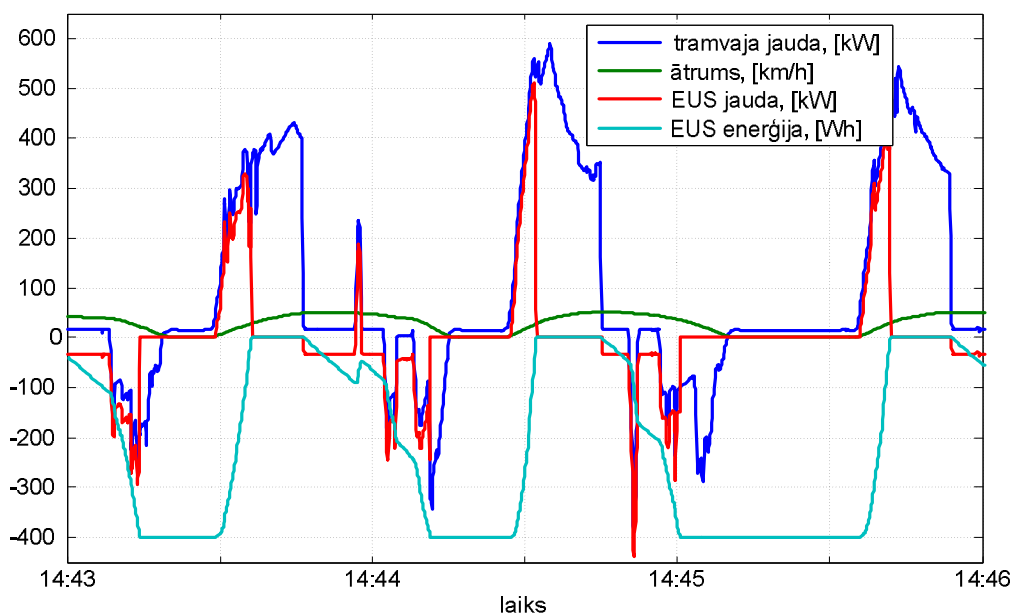
Vidējās jaudas vadības stratēģija

Teorētiskais minimums enerģijas patēriņā varētu tikt sasniegts, izmantojot EUS ar pietiekami lielu enerģijas ietilpību, lai no kontakttīkla tramvajs varētu tērēt, konstantu jaudu. Taču šāds EUS būtu nesamērīgi liels un dārgs. Šajā darbā pētīts tramvaja enerģijas patēriņš no apakšstacijas atkarībā no tramvajā uzstādāmās EUS ietilpības un iestatītā jaudas līmeņa, ko EUS censtos uzturēt tramvaja ieejā.

Attēls 4.12. rāda SIMULINK modeli no apakšstacijas patērētās enerģijas aprēķinam, kur transportlīdzeklī uzstādītā EUS enerģijas ietilpība ir E_{max} un tiek realizēta vidējās jaudas vadības stratēģija. Tipiska vidējās jaudas EUS vadības stratēģijas darbība pie $E_{max} = 0.4kWh$ parādīta 4.13. att.



4.12. att. SIMULINK modelis no apakšstacijas patērētās enerģijas aprēķinam, kur transportlīdzeklī uzstādītā EUS enerģijas ietilpība E_{max} , vadības stratēģija - „vidējās jaudas”



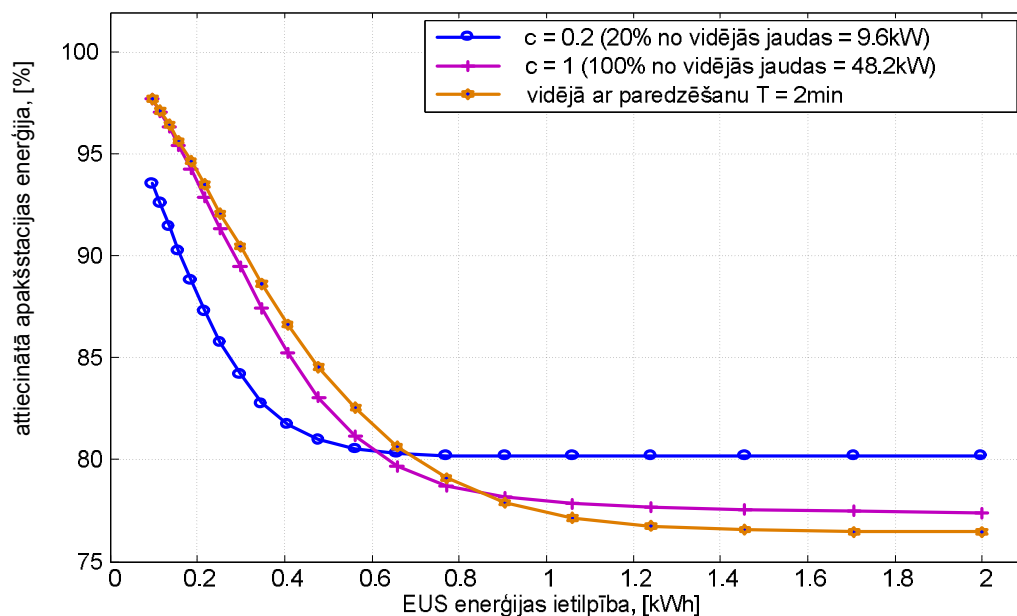
4.13. att. Tipiska vidējās jaudas EUS vadības stratēģijas darbība ($E_{max} = 0.4\text{kWh}$, $\eta = 1$, $c = 1$).

Vidējās jaudas ar prognozi vadības stratēģija

Tramvaja vidējā jauda mainās atkarībā no diennakts laika un, no tā, kurā maršruta posmā tramvajs atrodas. Tāpēc iepriekš aprakstītā vidējās jaudas vadības stratēģija var tikt uzlabota, ja varētu precīzi paredzēt tramvaja vidējo jaudu kādu laiku uz priekšu. Tas nozīmētu, ka EUS vadības sistēma censtos nodrošināt, lai tramvajs no kontakttīkla ņem nevis visas dienas vidējo jaudu, bet tikai pāris minūšu vidējo jaudu.

Attēls 4.14. rāda salīdzinājumu starp vidējās jaudas metodēm ar un bez jaudas prognozes. Metode ar prognozi ir realizēta tīri teorētiski vidējo jaudu diagrammu pa 2 min laika intervāliem. Daudz maz ievērojams ieguvums, izmantojot šo vadības metodi ar prognozi, ir novērojams pie EUS ietilpības kas lielāka par 1kWh. Tā kā šis

ieguvums ir aptuveni 1% un tikai pie lielas EUS ietilpības, tad šo vadības stratēģiju var uzskatīt par nepraktisku.



4.14. att. Vidējās jaudas un vidējās jaudas ar paredzēšanu EUS vadības stratēģijas salīdzinājums pie $\eta = 1$

Galotņu apcirpšanas vadības stratēģija

Darbības princips galotņu apcirpšanas metodei ir vienkāršs – uzkrāt visu bremsēšanas enerģiju un no EUS ņemt tikai tad, ja tramvaja jauda pārsniedz kādu noteiktu līmeni $P_l = l \cdot P_{peak}$ (P_{peak} – tramvaja maksimālā jauda).

Proporcionālā vadības stratēģija

Proporcionālās EUS vadības stratēģijas būtība ir uzkrāt bremsēšanas enerģiju un izlādēt EUS ar jaudu, kas proporcionāla tramvaja vilces jaudai.

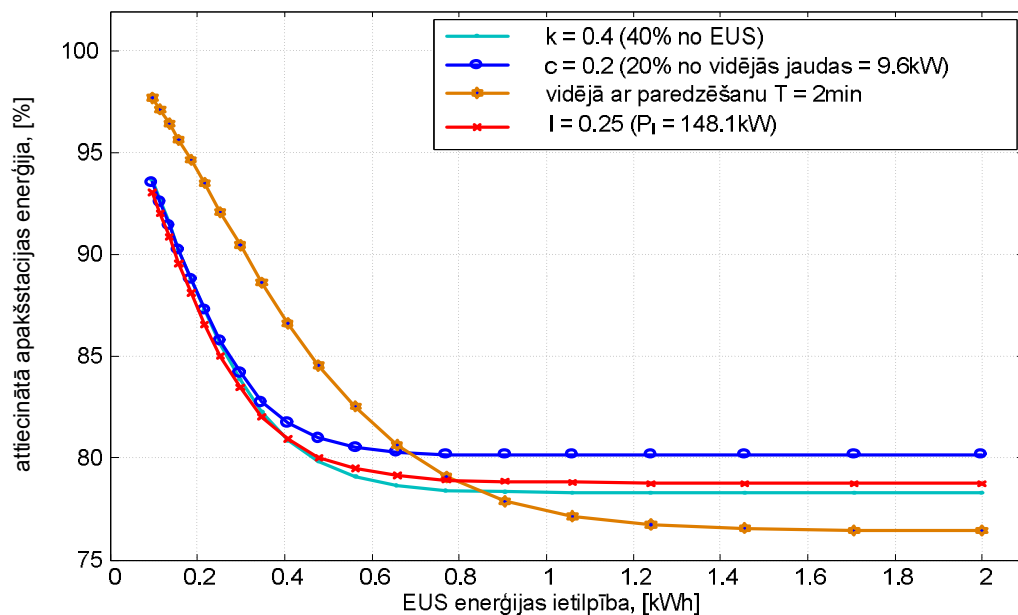
Vadības stratēģiju salīdzinājums

EUS vadības stratēģiju salīdzinājumam no katras stratēģijas izvēlēti sekojoši labākie gadījumi:

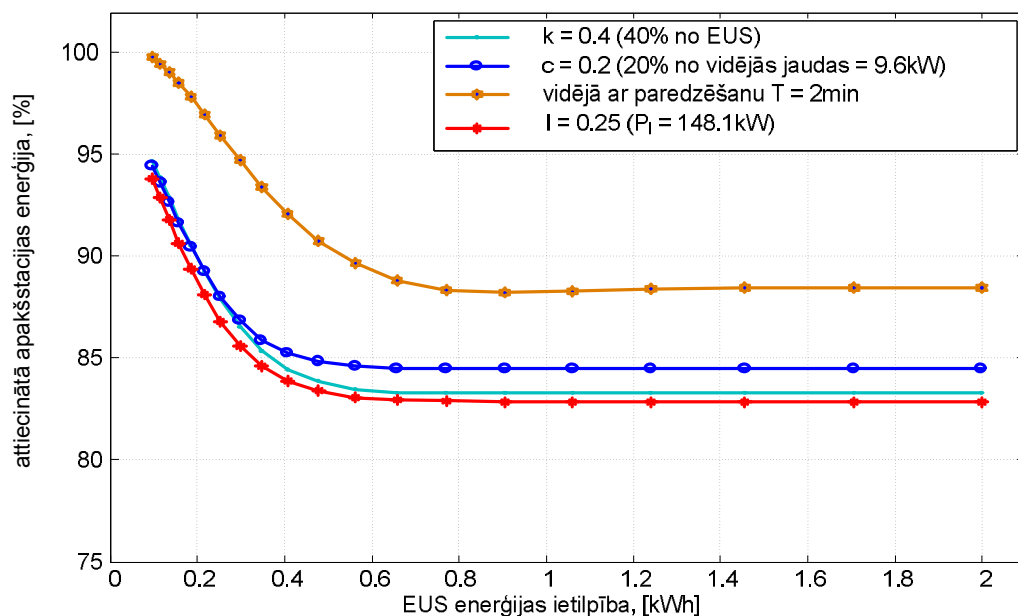
- vidējās jaudas stratēģija ar $c = 0.2$;
- vidējās jaudas ar paredzēšanu un vidējošanas intervālu $T = 2$ min stratēģija;
- galotņu apcirpšanas stratēģija ar $l = 0.25$;
- proporcionālā stratēģija ar $k = 0.4$.

Bezzudumu ($\eta = 1$) EUS gadījumā šīs metodes ir salīdzinātas 4.15. att. Redzams, ka pie mazas ietilpības EUS galotņu apcirpšanas un proporcionālā vadības stratēģija dod vislielāko enerģijas ietaupījumu. Savukārt pie $E_{max} > 0.85$ kWh ir vislabākā vidējā ar paredzēšanu vadības stratēģija.

Tā kā EUS ar efektivitāti $\eta = 1$ nav praktiski realizējama, tāpēc tika pētīta šī parametra ietekme uz ietaupāmās enerģijas daudzumu. Aprēķinu rezultāti pie $\eta = 0.9$ ir parādīti 4.16. att. Redzams, ka vidējās jaudas ar paredzēšanu EUS vadības stratēģija ir vissliktākā, turpretī galotņu apcirpšanas stratēģija ar $l = 0.25$ dod vislielāko enerģijas ietaupījumu neatkarīgi no EUS ietilpības.



4.15. No apakšstacijas patērētā enerģija atkarībā no E_{max} dažādām vadības stratēģijām pie $\eta = 1$



4.16. att. No apakšstacijas patērētā enerģija atkarībā no E_{max} dažādām vadības stratēģijām pie $\eta = 0.9$

Līdz ar to var secināt, ka:

- vidējās jaudas stratēģijai priekšrocības salīdzinājumā ar citām stratēģijām ir tikai pie lielām EUS ietilpībām, salīdzinoši lielām kontakttīkla pretestībām un, ja EUS ir ar augstu lietderību;
- ja kontakttīkla pretestība ir ap 0.1Ω un EUS lietderība ir mazāka par 95%, tad vislielāko enerģijas ietaupījumu nodrošina galotņu apcirpšanas metode, kur no EUS tiek nodrošināta vilces jaudas daļa, kas pārsniedz 25% līmeni no tramvaja maksimālās attīstītās jaudas;
- ja EUS $\eta < 0.95$, tad enerģijas ietilpības palielināšana virs 0.6kWh galotņu apcirpšanas stratēģijas gadījumā nedod papildus enerģijas ietaupījumu;

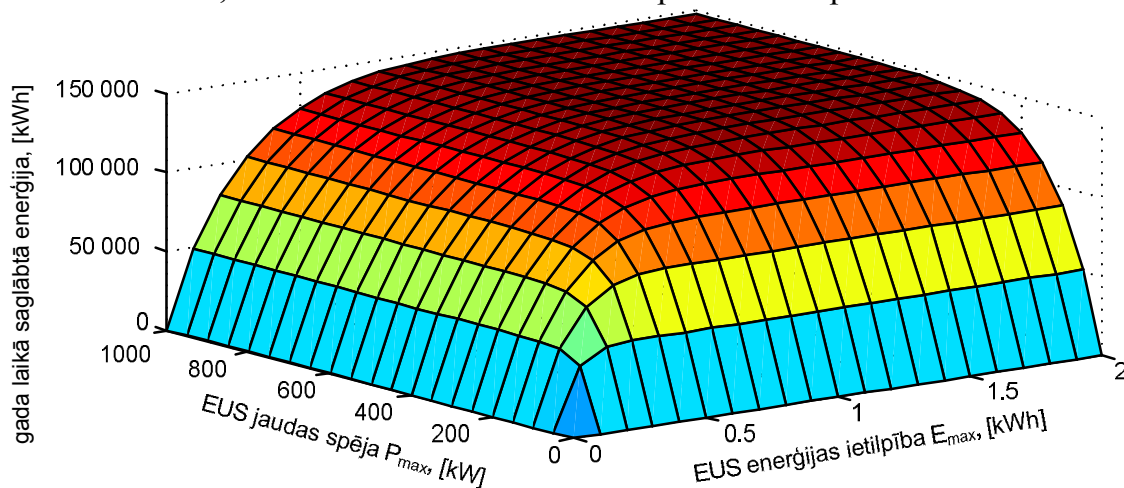
- iegūtie rezultāti nevar tikt vispārināti un ir derīgi tikai konkrētam maršrutam. Tomēr izmantotā metode var tikt izmantota citu maršrutu transportlīdzeklī uzstādāmā EUS optimālās enerģijas ietilpības un vadības stratēģijas atrašanā.

Izmantotās enerģijas atkarība no stacionāra EU parametriem

Apakšstacijā uzstādīta EUS galvenais uzdevums ir samazināt enerģijas patēriņu, kas nozīmē arī samazināt izmaksas. Izvēloties uzstādīt EUS ar neatbilstoši lieliem enerģijas ietilpības un jaudas spējas parametriem, iespējama situācija, ka EUS savā ekspluatācijas mūžā pietiekami daudz nesamazina izmaksas par enerģiju, lai sevi atpelnītu. Tāpēc ļoti svarīgi ir izvēlēties EUS ar optimāliem parametriem, lai enerģijas uzkrājēju izmantošanai būtu pozitīvs ekonomiskais efekts.

Šajā nodaļā, izmantojot iepriekš aprakstīto stohastiskās modelēšanas metodiku, pētīta sakarība, kā saglabājamās enerģijas daudzums ir atkarīgs no EUS enerģijas ietilpības un jaudas spējas. Kā piemērs izvēlēta 10. apakšstacija. Šīs apakšstacijas barošanas apgabalā pieņemts, ka kursē tikai sapāroti rekuperēt spējīgi T3A tramvaji.

Aprēķinu rezultāti parādīti 4.17. att. kā trīsdimensionāla virsma. Šie rezultāti var tikt izmantoti, izvēloties EUS ar ekonomiski pamatotiem parametriem.



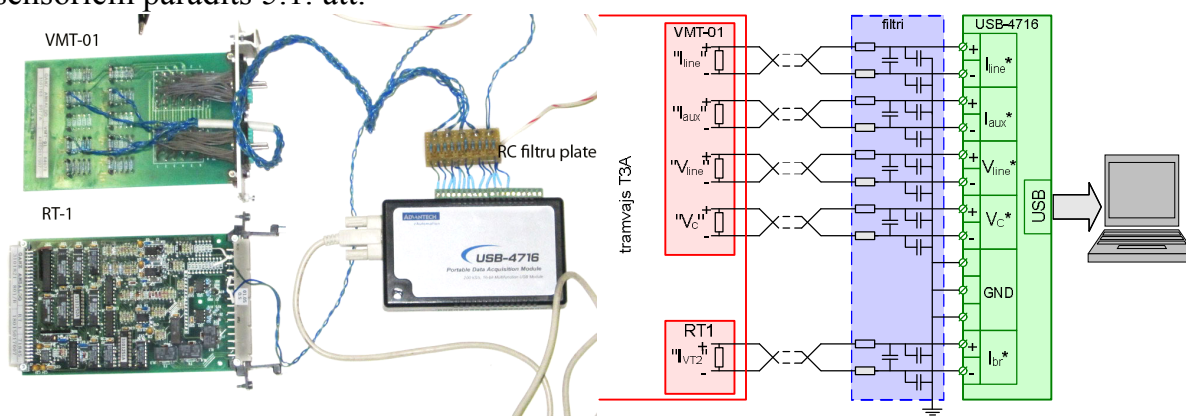
4.17. att. Gada laikā saglabājamā enerģija 10. apakšstacijai atkarībā no EUS P_{max} un E_{max}

5. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

Šajā nodaļā dots jaudas diagrammu eksperimentālās iegūšanas apraksts tramvajam T3A, kā arī dots izveidotā superkondensatoru parametru mērīšanas stenda apraksts un iegūto mērījumu rezultātu analīze.

Jaudas patēriņa diagrammas iegūšana tramvajam T3A

Lai novērtētu tramvaja jaudu, ir nepieciešams reģistrēt divu sprieguma sensoru un trīs strāvu sensoru signālus. Sensoru slodzes rezistori ir izvietoti tramvaja vadības plātēs VMT-1 un RT-1. Datu reģistrēšana tika veikta, izmantojot 16-bitu daudzfunkcionālu USB datu reģistrēšanas ierīci (USB-4716). Mēriekārtu pieslēgums sensoriem parādīts 5.1. att.



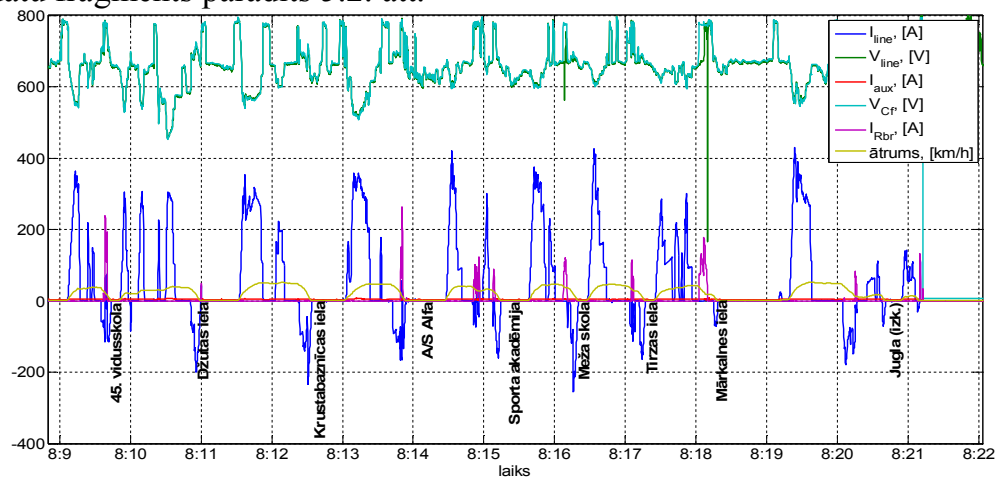
5.1. att. Datu reģistrējošās aparatūras pieslēgums tramvaja T3A vadības blokam: vadības kartes VMT-1, RT-1, RC filtru plate, USB datu reģistrēšanas ierīce USB-4716

RC filtru plate tiek lietota lai samazinātu trokšņa līmeni un vidējotu 1000Hz impulsveida i_{VT2} strāvu. Ņemot vērā sensoru mēroga koeficientus, tramvaja jauda tika aprēķināta sekojoši:

$$p_{tr} = 200v_{line}^* (200i_{line}^* + 20i_{aux}^*) - 12000v_C^* i_{VT2}^*, \quad (5.1)$$

kur v_{line}^* , i_{line}^* , i_{aux}^* , v_C^* , i_{VT2}^* ir atbilstošo spriegumu un strāvu nomērītie signāli voltos.

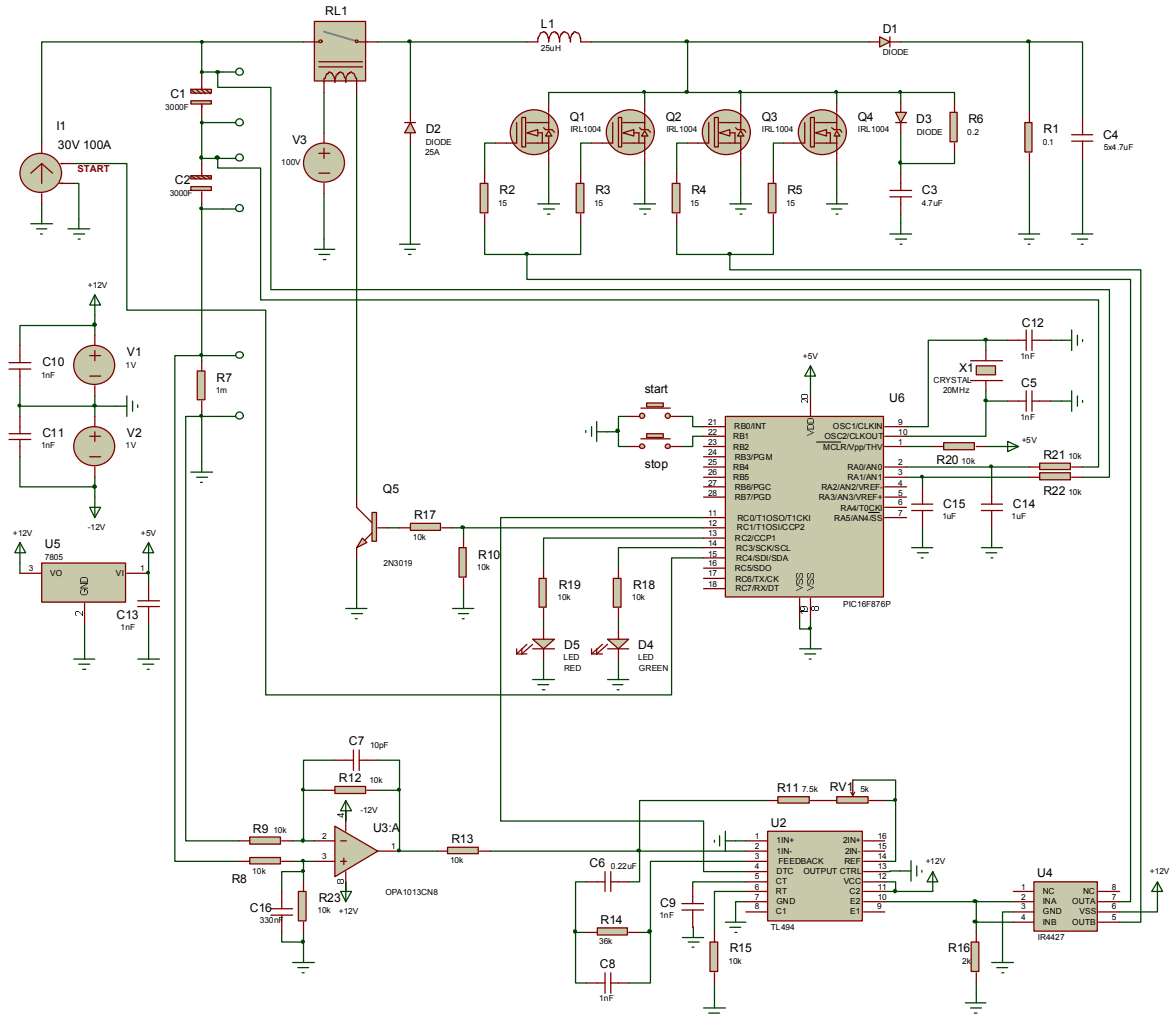
Lai no reģistrētajiem datiem varētu izdalīt datus, kas atbilst interesējošajam apakšstacijas barošanas apgabalam, tika izmantots GPS datu reģistrators i-Blue 747. Iegūto datu fragments parādīts 5.2. att.



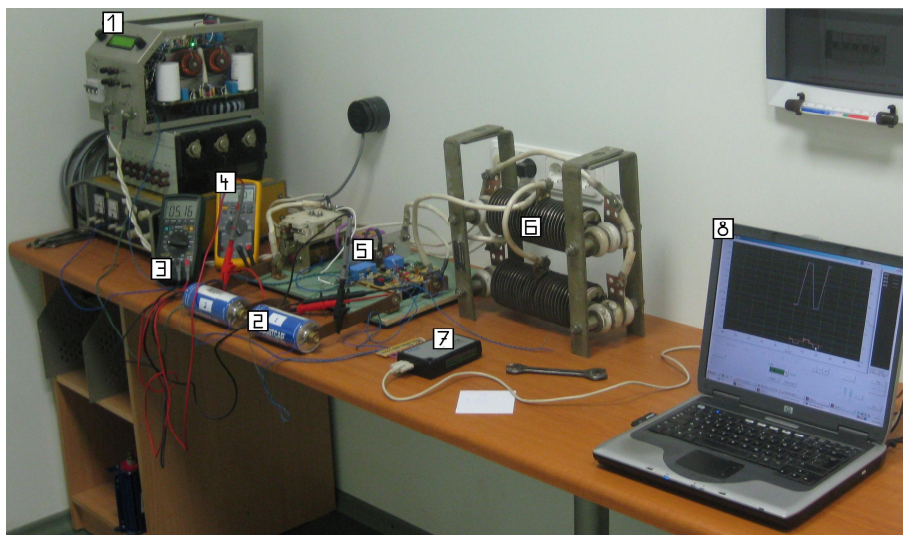
5.2. att. Reģistrēto tramvaja T3A datu fragments

Superkondensatoru kapacitātes mērīšana

Kapacitāšu balansēšanas metodes praktiskai pielietojšanai ir nepieciešams iepirktajai superkondensatoru partijai nomērīt katra superkondensatora kapacitāti. Tāpēc, lai apgūtu kapacitāšu mērīšanas tehnoloģiju, tika izveidots superkondensatoru kapacitātes mērīšanas stends (5.4. att.), kas nodrošina konstantas strāvas superkondensatoru uzlādi un izlādi. Stenda elektriskā shēma parādīta 5.3. att. Superkondensatoru uzlāde tiek veikta ar konstantas strāvas laboratorijas avotu I1, kura maksimālā strāva ir 100A. Savukārt izlādei izgatavota ierīce (5.4. att. 5.), kas nodrošina konstantu 100A stipru izlādes strāvu uz reostatu R1.



5.3. att. Superkondensatoru uzlādes/izlādes stenda elektriskā shēma

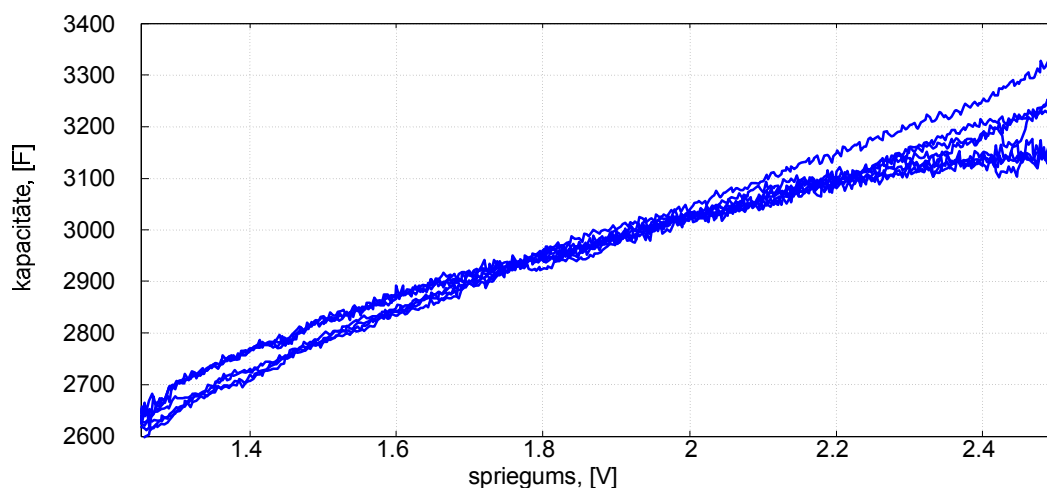


5.4. att. 100A konstantas strāvas superkondensatoru uzlādes-izlādes stends (1. 100A strāvas avots; 2. superkondensatori; 3. Superkondensatoru sprieguma indikators; 4. strāvas indikators; 5. konstantas strāvas izlādes ierīce; 6. izlādes reostats; 7. USB-4716 16-bitu ACP; 8. portatīvais dators ar WaveScan 2.0 datu reģistrēšanas programmu)

Lādējot kondensatoru ar konstantu strāvu, sprieguma kritums uz iekšējās pretestības ir konstants un sprieguma pieaugums uz superkondensatora spailēm ir tieši proporcionāls pievadītajam lādiņam un apgriezti proporcionāls kapacitātei. Kapacitāti nosaka no izteiksmes:

$$C = \frac{I\Delta t}{\Delta V} \quad (5.2)$$

Ja laika intervāli Δt ir pietiekami mazi, izteiksme (5.2) izsaka dinamisko kapacitāti, ar ko var labi raksturot tās nelinearitāti. Stendā superkondensatori tika lādēti no aptuveni 1.25V līdz 2.5V. Viena superkondensatora dinamiskās kapacitātes izmaiņa četros uzlādes-izlādes ciklos ir parādīta 5.5. att.



5.5. att. Superkondensatora dinamiskā kapacitāte

Eksperimentam bija pieejami 8 superkondensatori, kuru pie 2.1V nomērītās kapacitātes ir apkopotas 5.1. tabulā. Var redzēt, ka lielākā kapacitāšu starpība ir 210F.

5.1. tabula

Superkondensatoru kapacitātes nomērītas pie 2.1V

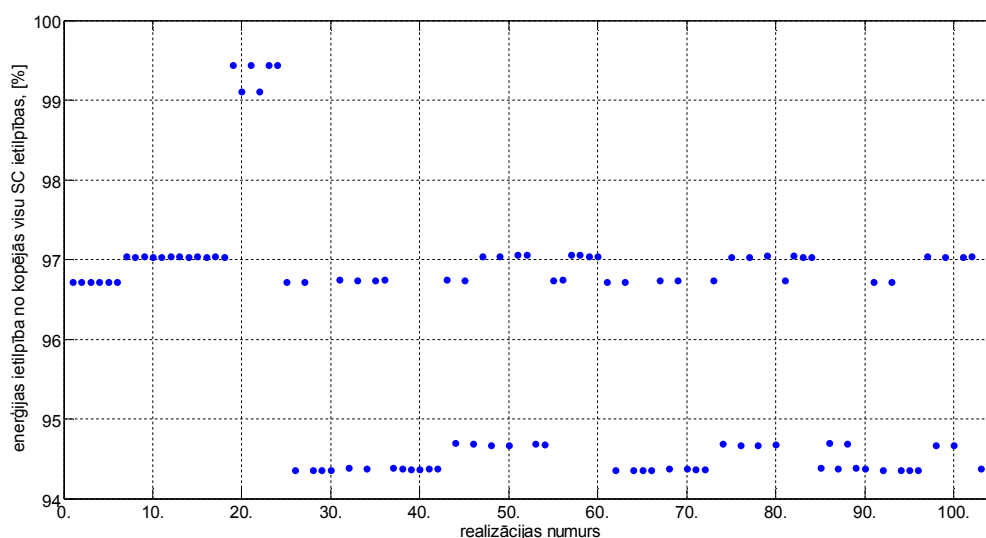
superkondensatora nr.	kapacitāte
1.	3075F
2.	3000F
3.	3000F
4.	2990F
5.	3200F
6.	3150F
7.	3180F
8.	3075F

Astoņus superkondensatorus pēc (5.3) var sakārtot pa pāriem 105 dažādos veidos.

$$N = \frac{n!}{\left(\frac{n}{2}\right)! \cdot 2^{\frac{n}{2}}} \quad (5.3)$$

kur n – superkondensatoru skaits (n = 8).

Efektīvā enerģijas ietilpība visiem 105 sakārtojumiem parādīta 5.6. att.



5.6. att. Astoņu superkondensatoru efektīvā enerģijas ietilpība dažādos paralēlā/virknes slēgumos

Sakārtojums, kas dod vislielāko enerģijas ietilpību, parādīts 5.2. tabulā.

5.2. tabula

Sabalansētās kapacitātes

sakārtojums	kapacitāte
1.+8.	6150F
2.+5.	6200F
3.+6.	6150F
4.+7.	6170F

Pēc kapacitāšu balansēšanas maksimālā kapacitāšu starpība ir samazināta līdz 50 F.

SLĒDZIENS

Rekuperētās bremsēšanas enerģijas racionāla izmantošana Rīgā kļūst sevišķi aktuāla pašlaik, kad rekuperējošo transportlīdzekļu īpatsvars ir pietuvojies 100%.

Darbā izstrādātā jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma metodika dod iespēju ātri novērtēt neizmantotās rekuperētās enerģijas daudzumu pilsētas elektrotransportā, kā ieejas datus izmantojot transportlīdzekļu jaudas diagrammas un kustību grafiku.

Otra izstrādātā stohastiskās modelēšanas metodika papildus neizmantotās enerģijas daudzuma novērtēšanai ļauj iegūt arī sakarību, kas parāda saglābtās enerģijas daudzuma atkarību no enerģijas uzkrājēja jaudas spējas un enerģijas ietilpības.

Abas metodikas dod iespēju veikt rekuperētās enerģijas izmantošanas pasākumu ekonomiskos aprēķinus arī tālākā perspektīvā, pamatojoties uz transportlīdzekļu parka atjaunošanas un kustības organizācijas perspektīvajiem plāniem.

Pielietojot jaudas varbūtību sadalījuma blīvuma metodiku 18 Rīgas perifērijas apakšstacijām, neizmantotā rekuperētā bremsēšanas enerģija gada laikā kopā tiek lēsta 1.26GWh apmērā.

Stacionāru vai mobilu enerģijas uzkrājēju pielietošana ļauj samazināt enerģijas patēriņu, samazināt jaudas svārstības maiņstrāvas barošanas tīklā, kā arī enerģijas uzkrājējs var strādāt kā maksimālās jaudas ierobežotājs.

Transportlīdzeklī uzstādīts enerģijas uzkrājējs dotu vislielāko enerģijas ietaupījumu, taču ekspluatācijā esošo tramvaju un trolejbusu konstrukcijā (izņemot trolejbusus Škoda 24TR, kuros nav uzstādīts dīzeļģenerators), vieta enerģijas uzkrājumam nav atrodama. Tāpēc Rīgā rekuperētās bremsēšanas enerģijas izmantošanai ieteicams uzstādīt superkondensatoru enerģijas uzkrājējus barošanas apakšstacijās.

Darba ietvaros izstrādāto transportlīdzeklī uzstādāmu superkondensatoru enerģijas uzkrājējsistēmu datormodelu simulēšanas rezultāti demonstrē stabilu sistēmu darbību un efektīvu rekuperētās enerģijas uzkrāšanu un izmantošanu.

No salīdzinātajām transportlīdzeklī uzstādāmas EUS vadības stratēģijām kā efektīvākā atzīta „galotņu apcirpšanas” stratēģija.

Piedāvātais kapacitāšu balansēšanas princips var tik izmantots superkondensatoru baterijas virknē slēgto kapacitāšu sprieguma disbalansa novēršanai, taču principa efektivitātes pārbaudei nepieciešams veikt ilgstošus praktiskus eksperimentus ar lielu skaitu superkondensatoru.

Jāatrod līdzekļi pirmā enerģijas uzkrājēja izgatavošanai un uzstādīšanai kādā no perifērijas apakšstacijām, teorētisko pētījumu eksperimentālai apstiprināšanai.

Pirmā kārtā būtu jāuzstāda enerģijas uzkrājēji apakšstacijās: Nr. 5; 7; 8; 10; 11; 12; 13; 16; 17; 20; 22; 27; 29; 30, kas varētu dot ap 800 MWh gada enerģijas ekonomiju. Enerģijas uzkrājēju uzstādīšanas lietderība centra apakšstacijās jāpēta atsevišķi.

Katrai apakšstacijai jāveic atsevišķi aprēķini enerģijas uzkrājēja optimālās jaudas un energoietilpības izvēlei, ņemot vērā pašreizējo un perspektīvo transporta kustības organizāciju.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] “Rīgas pilsētas ilgtspējīgas enerģētikas rīcības plāns 2010. - 2020. gadam,” Rīgas enerģētikas aģentūra, Rīga, 2010.
- [2] I. Rankis and V. Brazis, “Simulation of Tramcar’s Energy Balance,” in *2nd Intern. Conf. “Simulation, Gaming, Training and Business Process Reengineering in Operations,”* Riga, Latvia, 2000, pp. 160–163.
- [3] W. Günselmann, “Technologies for increased energy efficiency in railway systems,” in *European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2005*, Dresden, Germany, 2005, pp. 1–10.
- [4] A. Vitols and I. Rankis, “Experimental Results from Physical Model of Bidirectional Power Flow Regulator for Power Substations of Electrical Transport,” *Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering*, vol. 25, no. 25, pp. 127–132, 2009.
- [5] A. Vītols, “Pilsētas elektrotransporta vilces apakšstaciju divvirzienu enerģijas plūsmas energoelektronisko pārveidotāju izpēte,” promocijas darbs, RTU, Rīga, Latvija, 2007.
- [6] S. Sagareli and V. Gelman, “Implementation of new technologies in traction power systems,” in *Rail Conference, 2004. Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint*, Baltimore, MD, USA, 2004, pp. 141–146.
- [7] B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, and M. Klohr, “Study and simulation of the energy balance of an urban transportation network,” in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2007, pp. 1–10.
- [8] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, “Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles,” in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2007, pp. 1–10.
- [9] Z. Gizinski, M. Gasiewski, I. Mascibrodzki, M. Zych, K. Zymmer, and M. Zulawnik, “Hybrid - type system of power supply for a trolleybus with an asynchronous motor,” in *13th Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008*, 2008, pp. 1562–1567.
- [10] V. Brazis, L. Latkovskis, and L. Grigāns, “Simulation of Trolleybus Traction Induction Drive with Supercapacitor Energy Storage System,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 5, pp. 33–47, 2010.
- [11] V. Brazis, M. Gorobecs, L. Grigans, and A. Levcenkovs, “Optimization of Energy Consumption for Light Rail Electric Transport with Supercapacitor System Using Neural Network Controllers,” in *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems: ITELMS 2009: Proceedings of the 4th International Conference*, Lithuania, Panevėžys, 2009, pp. 118–126.
- [12] A. Rufer, P. Barrade, and D. Hotellier, “Power-electronic interface for a supercapacitor-based energy-storage substation in DC-transportation networks,” in *Proceedings of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications*, France, Toulouse, 2003, p. D1–D8.
- [13] A. Rufer, D. Hotellier, and P. Barrade, “A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 629–636, Apr. 2004.
- [14] L. Romo, D. Turner, and L. S. B. Ng, “Cutting traction power costs with wayside energy storage systems in rail transit systems,” in *Rail Conference, 2005. Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint*, Pueblo, Colorado USA, 2005, pp. 187–192.
- [15] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, “Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network,” in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC’08. IEEE*, Harbin, Hei Longjiang, China, 2008, pp. 1–8.

- [16] L. Ribickis and I. Rankis, *Electrical Drives - static characteristics and methods of speed control*. RTU Books Publishers, 1996.
- [17] J. Dirba, K. Ketners, N. Levins, and V. Pugačevs, *Transporta elektriskās mašīnas*. Rīga, Latvija: Jumava, 2002.
- [18] “Rīgas Tramvajs || Dažos vārdos par tramvaju.” [Online]. Available: http://riga.mashke.org/Riga-Tram/tram_lat.htm. [Accessed: 03-Feb-2012].
- [19] L. Latkovskis and L. Grigāns, “Pilsētas elektrotransportā neizmantojās rekuperētās enerģijas aprēķina metodika,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 4, pp. 21–28, 2007.
- [20] L. Grigāns and L. Latkovskis, “A Method for Estimation of the Untapped Regenerative Braking Energy in Urban Electric Transport,” in *5th Conference of Young Scientists on Energy Issues CYSENI 2008*, Kaunas, Lithuania, 2008, pp. 41–48.
- [21] L. Grigāns and L. Latkovskis, “Estimation of the power and energy requirements for trackside energy storage systems,” in *13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 09*, Spain, Barcelona, 2009, p. P1–P7.
- [22] R. Teymourfar, R. Nejati Fard, B. Asaei, and H. Iman-Eini, “Energy recovery in a metro network using stationary supercapacitors,” in *2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2011*, Tehran, Iran, 2011, pp. 324–329.
- [23] L. Romo, D. Turner, J. Ponzio, and L. S. B. Ng, “Return on Investment from Rail Transit Use of Wayside Energy Storage Systems,” in *2005 Railroad Environmental Conference*, Illinois, USA, 2005, p. 9.
- [24] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, “Quasi-static simulation method for evaluation of energy consumption in hybrid light rail vehicles,” in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08*, Harbin, Hei Longjiang, China, 2008, pp. 1–7.
- [25] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, “Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles,” in *13th Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008.*, Poznan, Poland, 2008, pp. 1512–1517.
- [26] M. Z. Chymera, A. C. Renfrew, M. Barnes, and J. Holden, “Modeling Electrified Transit Systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2748–2756, 2010.
- [27] L. Latkovskis, L. Grigāns, J. Černovs, and U. Sirmelis, “Neizmantojās rekuperētās enerģijas aplēse Rīgas elektriskajā sabiedriskajā transportā,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 1, pp. 47–56, 2010.
- [28] R. Barrero, X. Tackoen, and J. van Mierlo, “Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, no. 3, pp. 207–225, May 2010.
- [29] D. Iannuzzi and D. Lauria, “A New Supercapacitor Design Methodology for Light Transportation Systems Saving.”
- [30] L. Battistelli, F. Ciccarelli, D. Lauria, and D. Proto, “Optimal design of DC electrified railway stationary storage system,” in *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on*, 2009, pp. 739–745.
- [31] M. Chymera, A. C. Renfrew, and M. Barnes, “Analyzing the potential of energy storage on electrified transit systems,” in *Proceedings of the 8th World Congress of Railway Research*, Seoul, Korea, 2008, p. 10.
- [32] Gildong Kim and Hanmin Lee, “A Study on the Application of ESS on SeoulMetro Line 2,” in *International Conference on Information and Multimedia Technology, 2009. ICIMT '09*, 2009, pp. 38–42.
- [33] K. J. Kutsmeda, K. G. Fehrle, and P. J. Trick, “Computer modeling, simulation, and validation by field testing of a traction power system for electric trolley buses,” in

- Railroad Conference, 1995., Proceedings of the 1995 IEEE/ASME Joint, 1995, pp. 87–91.*
- [34] D. Cornic, “Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation,” in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2010*, 2010, pp. 1–9.
- [35] J. B. Forsythe, “Light Rail/Rapid Transit: New Approaches for the Evaluation of Energy Savings, Part I - Life-Cycle Cost from Synthetic Routes/Operational Models,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-16, no. 5, pp. 655–665, Sep. 1980.
- [36] J. B. Forsythe, “Light Rail/Rapid Transit: New Approaches for the Evaluation of Energy Savings, Part II - On the Receptivity of a Transit System,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-16, no. 5, pp. 665–678, Sep. 1980.
- [37] I. Rankis, A. Vitols, and A. Ziravecka, “Evaluation of Utilization Efficiency of Regenerative Energy in the Riga Tramcar System,” *RTU zinātniskie raksti 4. sēr., Energētika un elektrotehnika - 20. sēj.*, p. 51.–57., 2007.
- [38] E. Jakubaitis, *Tehniskās kibernetikas pamati*. Rīga: Latvijas Valsts izdevniecība, 1962.
- [39] E. Beķeris, *Signālu teorijas elementi*. Rīga: Mācību apgāds, 1998.
- [40] E. J. Borowski and J. M. Borwein, *Collins Dictionary of Mathematics*. Glasgow: Caledonia International Book Manufacturing Ltd, 1989.
- [41] T. T. Soong, *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [42] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, and A. Berthon, “Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling,” *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 928–934, Mar. 2007.
- [43] A. Schneuwly and R. Gallay, “Properties and applications of supercapacitors From the state-of-the-art to future trends,” in *Proceedings of PCIM 2000*, Nürnberg, Germany, 2000, p. 10.
- [44] M. Mastragostino and F. Soavi, “Strategies for high-performance supercapacitors for HEV,” *Journal of Power Sources*, vol. 174, no. 1, pp. 89–93, Nov. 2007.
- [45] R. Kötz and M. Carlen, “Principles and applications of electrochemical capacitors,” *Electrochimica Acta*, vol. 45, no. 15–16, pp. 2483–2498, 2000.
- [46] O. Vasile V.N., “On the performance of supercapacitors with electrodes based on carbon nanotubes and carbon activated material—A review,” *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 40, no. 7, pp. 2596–2605, May 2008.
- [47] J. R. Miller and A. F. Burke, “Electrochemical Capacitors: Challenges and Opportunities for Real-World Applications,” *Electrochemical Society Interface*, p. 53, 2008.
- [48] J. Miller, “A brief history of supercapacitors,” *Battery+Energy Storage Technology*, p. 61, 2007.
- [49] H. Helmholtz, “Ueber einige Gesetze der Vertheilung elektrischer Ströme in körperlichen Leitern, mit Anwendung auf die thierisch-elektrischen Versuche (Schluss.),” *Annalen der Physik*, vol. 165, no. 7, pp. 353–377, Jan. 1853.
- [50] B. E. Conway, *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*. Springer Us, 1999.
- [51] H. I. Becker, “Low voltage electrolytic capacitor,” U.S. Patent 280061623-Jul-1957.
- [52] D. L. Boos, “Electrolytic Capacitor Having Carbon Paste Electrodes,” U.S. Patent 353696327-Oct-1970.
- [53] T. Murphy, R. Wright, and R. Sutula, “US Department of Energy Electrochemical Capacitor Development and Testing Activities,” in *Proceedings of the Symposium on Electrochemical Capacitors II*, F.M. Delnick, D. Ingersoll, X. Andrieu, K. Naoi (Eds.), vol. 96-25, Pennington, NJ: The Electrochemical Society, 1997, p. 258.
- [54] “The Future of Ultracapacitors – Market Forecasts to 2014,” Pira International, 2009.

- [55] “Program on Technology Innovation: Application of Advanced Nanomaterials for Ultracapacitors,” EPRI, Palo Alto, CA, 1014850, 2007.
- [56] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1513–1522, 2009.
- [57] F. Belhachemi, S. Rael, and B. Davat, “A physical based model of power electric double-layer supercapacitors,” in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference*, 2000, vol. 5, pp. 3069–3076 vol.5.
- [58] J.-S. Lai, S. Levy, and M. F. Rose, “High energy density double-layer capacitors for energy storage applications,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 14–19, Apr. 1992.
- [59] L. Zubieta and R. Bonert, “Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, Feb. 2000.
- [60] R. A. Dougal, L. Gao, and S. Liu, “Ultracapacitor model with automatic order selection and capacity scaling for dynamic system simulation,” *Journal of Power Sources*, vol. 126, no. 1–2, pp. 250–257, Feb. 2004.
- [61] L. Latkovskis and V. Brazis, “Simulation of the regenerative energy storage with supercapacitors in tatra T3A type trams,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation UKSIM 2008*, Cambridge, UK, 2008, pp. 398–403.
- [62] “Product Guide - BOOSTCAP Ultracapacitors - Doc. No. 1014627.1,” Maxwell Technologies, Inc., 2009.
- [63] “UltraCap double layer capacitors, a new energy storage device for peak power applications, product profile.” EPCOS, 2002.
- [64] A. Hammar, P. Venet, R. Lallemand, G. Coquery, and G. Rojat, “Study of Accelerated Aging of Supercapacitors for Transport Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3972–3979, Dec. 2010.
- [65] P. Barrade, “Series Connection of Supercapacitors: Comparative Study of Solutions for the Active equalization of the Voltages,” *Electrimacs 2002, 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems*, vol. 2, no. 3, p. 4, Aug. 2002.
- [66] D. Linzen, S. Buller, E. Karden, and R. W. De Doncker, “Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1135–1141, 2005.
- [67] Y. Diab, P. Venet, and G. Rojat, “Comparison of the Different Circuits Used for Balancing the Voltage of Supercapacitors: Studying Performance and Lifetime of Supercapacitors,” in *ESSCAP’2006*, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [68] M. Okamura, K. Hayashi, and Y. Katoh, “Electronics to Boost the Usable Energy of Capacitors,” in *The 15th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices*, FL, USA, 2005.
- [69] R. Kötz, J.-C. Sauter, P. Ruch, P. Dietrich, F. N. Büchi, P. A. Magne, and P. Varenne, “Voltage balancing: Long-term experience with the 250 V supercapacitor module of the hybrid fuel cell vehicle HY-LIGHT,” *Journal of Power Sources*, vol. 174, no. 1, pp. 264–271, Nov. 2007.
- [70] R. Kotz and J.-C. Sauter, “Detachable Charge Control Circuit for Balancing the Voltage of Supercapacitors Connected in Series,” U.S. Patent US20080309295.
- [71] P. Barrade, S. Pittet, and A. Rufer, “Series connection of supercapacitors, with an active device for equalizing the voltages,” in *PCIM2000 Power Conversion and Intelligent Motion*, Nürnberg, Germany, 2000, p. 6.

- [72] U. Sirmelis and L. Grigāns, "Capacitance balancing for supercapacitive energy storage system," in *10th International Symposium – Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering*, Estonia, Pärnu, 2011.
- [73] A. Schneuwly, M. Bärtschi, V. Hermann, G. Sartorelli, R. Gallay, and R. Koetz, "BOOSTCAP - Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications," in *Proceedings on Advanced Automotive Battery and EC Capacitor*, Las Vegas, Nevada USA, 2002.
- [74] H. Hõimoja, "Energy Efficiency Estimation and Energy Storage Calculation Methods for Urban Electric Transportation," PhD Thesis, TTU, Tallin, Estonia, 2009.
- [75] M. Gorobečs, "Ģenētisko algoritmu izpēte elektriskā transporta optimālai vadībai," promocijas darbs, RTU, Rīga, Latvija, 2008.
- [76] I. Rankis, L. Ribickis, and A. Vitols, "Investigation of Bidirectional Power Supply Regulator for Electrical Traction Substations," *Scientific Journal of RTU. 4. series., Energētika un elektrotehnika*, vol. 18, pp. 78–83, 2006.
- [77] M. Shafiqhy, S. Y. Khoo, and A. Z. Kouzani, "Energy Efficiency Methods in Electrified Railways Based on Recovery of Regenerated Power," in *Electrical Engineering and Control*, vol. 98, M. Zhu, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, pp. 69–77.
- [78] V. Brazis and L. Latkovskis, "Application of supercapacitors for storage of regenerative energy in T3A tramcars," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 5, pp. 23–33, 2007.
- [79] L. Latkovskis, V. Brazis, and L. Grigans, "Simulation of On-Board Supercapacitor Energy Storage System for Tatra T3A Type Tramcars," in *Modelling Simulation and Optimization*, Gregorio Romero Rey and Luisa Martinez Muneta (Ed.), InTech, 2010, pp. 307–330.
- [80] L. Latkovskis and L. Grigāns, "Estimation of the untapped regenerative braking energy in urban electric transportation network," in *13th Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008*, Poznan, Poland, 2008, pp. 2089–2093.
- [81] L. Latkovskis and L. Grigans, "Continuous PSIM Model of the Supercapacitor Energy Storage System for Simulation of Long Processes," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 5, pp. 13–20, 2009.
- [82] I. Szenasy, "Improvement the energy storage with ultracapacitor in metro railcar by modeling and simulation," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, Harbin, Hei Longjiang, China, 2008, pp. 1–5.
- [83] I. Szenasy, "New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*, Dearborn, MI USA, 2009, pp. 181–187.
- [84] P. Drabek and L. Streit, "The energy storage system for public transport vehicles," in *13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09.*, Barcelona, Spain, 2009, pp. 1–10.
- [85] T. Knoke, C. Romaus, J. Bocker, A. Dell'Aere, and K. Witting, "Energy Management for an Onboard Storage System Based on Multi-Objective Optimization," in *IEEE IECON 2006 - 32nd Annual Conference on Industrial Electronics*, Paris, France, 2006, pp. 4677–4682.
- [86] L. Grigans and L. Latkovskis, "Study of control strategies for energy storage system on board of urban electric vehicles," in *14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, Macedonia, Ohrid, 2010, pp. T9–34–T9–38.