

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

Uģis SIRMELIS

Doktora studiju programmas «Elektrotehnoloģiju datorvadība» doktorants

**PILSĒTAS ELEKTROTRANSPORTA SISTĒMU MODELĒŠANA
OPTIMĀLU ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU PARAMETRU IZVĒLEI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
Dr. sc. ing. **L. LATKOVSKIS**
Dr. sc. ing. J. ZAČIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2015

Sirmelis U. Pilsētas elektrotransporta sistēmu modelēšana optimālu enerģijas uzkrājēju parametru izvēlei. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2015. – 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta padomes sēdes 2015. gada 5. oktobra lēmumu. Protokols Nr.57.

Šis darbs izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes atbalstu projektā «Jauns integrēts pazeminošais-paaugstinošais daudz-līmeņu invertors atjaunojamās enerģijas pielietojumiem», projekta Nr.: 673/2014

ISBN 978-9934-10-768-9

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 7. janvārī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

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

Profesors, *PhD* Tenu Lehtla
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

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

Uģis Sirmelis

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā. Darbā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 91 zīmējums un ilustrācija, 10 tabulas, kopā 110 lappuses. Literatūras sarakstā ir 106 nosaukumi.

Saturs

Promocijas darba vispārējais raksturojums	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Darba mērķis un uzdevumi.....	5
Pētījumu metodes un līdzekļi	5
Zinātniskās novitātes	6
Darba praktiskā nozīme.....	6
Darba aprobācija.....	6
Autora publikācijas.....	6
Ievads	8
1. Bremzēšanas enerģijas atgūšanas tehnoloģijas pilsētas elektriskā transporta sistēmās.....	9
1.1. Komerzializētās enerģijas uzkrāšanas sistēmas	9
1.2. Superkondensatoru sprieguma mērīšanas sistēma	9
2. Pilsētas elektriskā transporta sistēmas ar enerģijas uzkrājējiem modelēšana.....	11
2.1. Metode tramvaju elektriskā tīkla aizvietošanas modeļa iegūšanai	11
2.2. Elektriskā transporta sistēmas modelēšana <i>Matlab/Simulink</i> vidē	13
2.3. Analītiskais enerģijas uzkrāšanas sistēmas modelis	15
3. Optimāla superkondensatoru skaita noteikšanas metode enerģijas uzkrāšanas sistēmā	17
3.1. Metode, kas maksimizē stacionāras enerģijas uzkrāšanas sistēmas peļņu.....	17
3.2. Metodes lietojums mobilai enerģijas uzkrāšanas sistēmai.....	20
4. Enerģijas uzkrāšanas sistēmu parametru ietekme uz apakšstacijas enerģijas patēriņu	21
4.1. Mobilo enerģijas uzkrāšanas sistēmu parametru analīze	21
4.2. Stacionāro enerģijas uzkrāšanas sistēmu vadības parametru izpēte	26
Secinājumi par darbu	30
Literatūra.....	31

Promocijas darba vispārējais raksturojums

Tēmas aktualitāte

Izsīkstot naftas un dabasgāzes krājumiem, kuru izmantošana tautsaimniecībā veicina «siltumnīcas efektu», un, vienlaikus pieaugot pieprasījumam pēc enerģijas, arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta atjaunojamiem energoresursiem, energoefektivitātei un vides aizsardzībai. Šie ilgtspējīgas enerģētikas stūrakmeņi ir izvirzīti kā būtiski punkti arī Eiropas Komisijas noteiktajā Eiropas Savienības ekonomiskās attīstības stratēģijā [1], kas paredz līdz 2020. gadam ES teritorijā samazināt siltumnīcas efektu izraisošo gāzu emisiju par 20 % (salīdzinot ar 1990. gadu), palielināt atjaunojamās enerģijas īpatsvaru līdz 20 % un paaugstināt energoefektivitāti par 20 %.

Pilsētas elektriskais transports ir uzskatāms par videi draudzīgu pārvietošanās veidu pilsētvidē, tomēr arī uz to ir jāskatās kā potenciālu virzienu, kur iespējams paaugstināt energoefektivitāti. Piemēram, Rīgā pilsētas elektriskais transports, ko nodrošina SIA «Rīgas Satiksme», pēdējos gados patērē vidēji 60 GWh elektroenerģijas gadā, un tas ir aptuveni 2,5 % no kopējā Rīgas elektroenerģijas patēriņa [2]. Energoefektivitāti varētu paaugstināt, ja lietderīgāk tiktu izmantota enerģija, ko tramvaji un trolejbusi reģenerē bremzēšanas laikā. Šobrīd daļa no reģenerētās enerģijas tiek izkliedēta bremzēšanas rezistoros, kas ir energoneefektīvi. Gada laikā Rīgas pilsētas elektriskais transports šādā veidā nelietderīgi patērē aptuveni 2 GWh elektroenerģijas [3]. Aprīkojot elektriskā transporta sistēmas ar reversīvām vilces apakšstacijām vai enerģijas uzkrāšanas sistēmām (EUS), ir iespējams samazināt bremžu rezistoros izkliedētās enerģijas daudzumu. Šādu tehnoloģiju ieviešana ir dārga, tādēļ ir svarīgi optimizēt šo sistēmu parametrus, lai to darbība būtu maksimāli lietderīga.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba galvenais mērķis ir izpētīt, kādiem jābūt superkondensatoru (*SC — supercapacitors*) EUS parametriem, lai šādu sistēmu uzstādīšana pilsētas elektriskajā transportā būtu maksimāli lietderīga. Mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi uzdevumi:

- izstrādāt modeli, kas ļauj modelēt pilsētas elektriskā transporta sistēmu, kas aprīkota ar enerģijas uzkrājējiem;
- izstrādāt metodi, ar kuras palīdzību var noteikt nepieciešamo SC skaitu stacionārām un mobilām bremzēšanas enerģijas uzkrāšanas sistēmām;
- veikt vadības parametru ietekmes izvērtējumu EUS uzkrājējam, ņemot vērā atgūstamo enerģijas daudzumu.

Pētījumu metodes un līdzekļi

- Datorprogramma *Matlab* tika izmantota, lai izstrādātu vienkāršotus matemātiskos modeļus pilsētas elektriskā transporta sistēmai un veiktu eksperimentāli nomērīto datu apstrādi.
- *Matlab/Simulink* tika izmantots, lai izstrādātu detalizētus modeļus pilsētas elektriskā transporta sistēmai, EUS un tā vadības saitēm.
- Elektriskā transporta kontakttīkla ekvivalentās elektriskās shēmas iegūšanai izmantota datorprogramma *PSIM*.
- Datorprogrammā *MS Excel* izmantota trolejbusu kontaktlīniju pretestību aprēķinam.
- Tramvaju jaudas diagrammas tikai iegūtas, veicot mērījumus tramvajos T3A.
- Eksperimentos ar *SC* sprieguma monitoringa sistēmu tika izmantota Fizikālās enerģētikas institūta tehniskā bāze un iekārtas.

Zinātniskās novitātes

- Jauna metode SC skaita izvēlei bremzēšanas enerģijas uzkrāšanas sistēmās. Metode ļauj aplēst, kāds finansiālais ieguvums sagaidāms uz ietaupītās elektroenerģijas rēķina, kas rodas no vilces apakšstaciju vai tramvaju aprīkošanas ar dažādu parametru enerģijas uzkrāšanas sistēmām.
- Izolēta impulsregulatora izmantošana komparatoru atbalsta sprieguma formēšanai ar mērķi nomērīt virknē slēgtu enerģijas uzkrājēju (SC, litija-jonu akumulatoru) individuālu šūnu spriegumu.
- *Matlab/Simulink* modelis detalizētai radiālas barošanas topoloģijas pilsētas elektriskā transporta sistēmas modelēšanai.
- SC un divu kvadrantu impulsregulatora darbības aprakstīšana ar RLC virknes slēguma ķēdes vienādojumiem. Šo vienādojumu izmantošana ātrdarbīga un precīza EUS modeļa izveidei *Matlab/Simulink* vidē.

Darba praktiskā nozīme

- Izstrādātā EUS superkondensatoru skaita izvēles metode var tikt izmantota, lai novērtētu, vai ir racionāli apīkot vilces apakšstacijas vai transportlīdzekļus ar enerģijas uzkrāšanas sistēmām, kas enerģijas uzkrāšanai izmanto SC.
- Izstrādāto pilsētas elektriskā transporta modelēšanas rīku var izmantot, lai novērtētu esošās infrastruktūras jaudas rezervi, analizētu enerģijas patēriņu atsevišķos tās mezglos un noteiktu kontaktlīnijas vājos punktus. Tas var būt aktuāli, plānojot palielināt transportlīdzekļu kursēšanas intensitāti vai izvērtējot pilsētas elektriskā transporta barošanas infrastruktūras izmantošanas iespējas elektrisko auto lādēšanai.
- Darbā piedāvātais sprieguma monitoringa risinājums var tikt izmantots ne tikai SC sprieguma mērīšanai, bet arī citām enerģijas uzkrāšanas tehnoloģijām (piemēram, litija-jonu akumulatoriem).

Darba aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti šādās zinātniskās konferencēs:

- 14th European Conference on Power Electronics and Applications «EPE 2011 ECCE Europe», Birmingema, Lielbritānija, 30. augusts – 1. septembris, 2011.
- 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics «CPE 2015», Kaparika, Portugāle, 24.–26. jūnijs, 2015.
- 9th International Conference on Electrical and Control Technologies «ECT 2014», Kauņa, Lietuva, 8.–9. maijs, 2014.
- 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives «Powereng 2015», Rīga, Latvija, 11.–13. maijs, 2015.
- 12th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development», Jelgava, Latvija, 23.–24. maijs, 2015.
- 14th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development», Jelgava, Latvija, 20.–22. maijs, 2015.
- 5th European Symposium on Super Capacitors & Hybrid Solutions «ESSCAP 15», Brašova, Rumānija, 23.–25. aprīlis, 2015.

Autora publikācijas

- L. Latkovskis, U. Sirmelis, and L. Grigans, «On-board supercapacitor energy storage; Sizing considerations,» *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 49, no. 2, pp. 24–33, 2012.

- U. Sirmelis, «Braking Energy Recovery in Tram Systems Using Supercapacitors,» in Proceedings of the 9th International Conference on Electrical and Control Technologies, Lithuania, Kaunas, 2014, pp. 138–141.
- U. Sirmelis, J. Zakis, and L. Grigans, «Optimal Supercapacitor Energy Storage System Sizing for Traction Substations», in Proceedings of the conference POWERENG 15, Latvia, Rīga, 2015, p. 4.
- U. Sirmelis, L. Grigans, and L. Latkovskis, «An analytic simulation model for a supercapacitor-based energy storage system,» in Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), Birmingham, UK, 2011, pp. 1–10.
- U. Sirmelis, «ESS Sizing Considerations According to Control Strategy», in Proceedings of the Engineering for Rural Development conference, Latvia, Jelgava, 2013, pp. 346–351.
- U. Sirmelis, L. Grigans, J. Zakis, «Isolated DC/DC converter based voltage measuring system for series connected supercapacitor cells», in Proceedings of CPE2015 conference, Caparica, Portugal, 2015, pp. 4.
- U. Sirmelis, L. Grigans «Stationary ESS Control According to Tram Traffic Intensity» in Proceedings of the Engineering for Rural Development conference, Latvia, Jelgava, 2015, pp. 377–382.
- L. Grigans, U. Sirmelis, K. Kroics, «Optimal Supercapacitive Energy Storage Sizing for Mobile Application» in Proceedings of the 5th European Symposium on Super Capacitors & Hybrid Solutions, Romania, 2015, pp. 7.

Ievads

SC kā enerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas lietošana bremsēšanas enerģijas atgūšanai kļuva aktuāla ap 1990. gadu, kad kļuva pieejami SC ar labiem jaudas parametriem [4]. Pētījumi par SC lietošanu pilsētas elektriskajā transportā tika sākti 2000. gadā, kad «Siemens» sāka stacionāras enerģijas uzkrāšanas sistēmas (EUS) *Sitras SES* izstrādi, kuras galvenie uzdevumi bija uzkrāt bremsēšanas enerģiju un stabilizēt spriegumu kontakttīkla vātajos punktos. 2003. gadā izstrādātās iekārtas tika testētas Madridē, Ķelnē un Drēzdenē [5].

Šveices zinātnieku grupa laikā no 2003. līdz 2007. gadam pētījuši gan stacionāro, gan mobilo EUS izmantošanu. Pētījumā par mobilo EUS tiek secināts, ka, uzstādot SC EUS tramvajā, var samazināt tā enerģijas patēriņu līdz pat 25,6 % [6], taču jāmin, ka pētījumā netiek pamatota SC baterijas enerģijas ietilpības izvēle, kas nozīmē, ka ar šādu enerģijas patēriņa samazinājumu var nepietikt, lai ilgtermiņā nosegtu izmaksas, kas saistītas ar uzkrājēja uzstādīšanu. Stacionāru EUS uzstādīšanu tramvaju sistēmā, šī grupa pētījusi kā alternatīvu risinājumu jaunas barošanas apakšstacijas izbūvei, kuras mērķis ir mazināt sprieguma kritumus kontaktlīnijas vātajos punktos [7].

Pētījumi šajā jomā arī veikti Briseles Brīvajā universitātē. Pētījumā par metro sistēmā uzstādītu mobilo EUS tiek parādīts, kā vadības stratēģija ietekmē atgūto bremsēšanas enerģijas daudzumu [8]. Līdzīgs pētījums arī veikts par tramvajiem, kas aprīkoti ar mobilām EUS. Pētījumā par tramvajiem skarts arī EUS dimensionēšanas jautājums. EUS lietderība (atgūstamās enerģijas daudzums) salīdzināta dažādam SC skaitam. Secināts, ka labākie rezultāti sagaidāmi ar lielāko SC bateriju, taču diskusijai izvirzīts jautājums par tās rentabilitāti [9], [10]. Stacionārām EUS piedāvāts algoritms, kas nodrošina rekuperētās enerģijas uzlādi un izlādi. Parādīts, kā mainās enerģijas patēriņš no apakšstacijas ar dažādas kapacitātes EUS. Analizētas arī situācijas, kad uz vienas līnijas ir uzstādītas vairākas EUS. Iegūtie simulāciju rezultāti rāda, ka stacionāra EUS atkarībā no satiksmes intensitātes ļauj samazināt enerģijas patēriņu par 11–26 %. [11], [12].

Vairāki pētījumi par SC izmantošanu EUS veikti Neapoles Universitātē. Šajos pētījumos SC lietojums galvenokārt tiek apskatīts metro sistēmās. Vairākos rakstos atspoguļota SC baterijas optimizēšanas metode mobilas EUS izpildījumam. Optimizēšana veikta, lai samazinātu apakšstacijas pīķa strāvu un mazinātu sprieguma svārstības metro vilciena ieejā [13], [14]. Piedāvāts arī mobilas EUS vadības algoritms, kas nodrošina bremsēšanas enerģijas optimālu uzkrāšanu un analizēta EUS uzstādīšanas finansiālais ieguvums [15]. Stacionārām EUS tiek apskatīts variants, kad tās ir uzstādītas metro sistēmu kontaktlīniju galapunktos. Tiek piedāvāti dažādi vadības algoritmi, kurus salīdzina ar vairāku kritēriju optimizācijas metodēm, lai meklētu kompromisu starp kopējā enerģijas patēriņa samazinājumu un sprieguma stabilizāciju kontakttīklos [16], [17], [18], [19], [20].

Tramvaju sistēmas, kas raksturīgas Austrumeiropai, pētītas Tallinas Tehnoloģiju universitātē un Fizikālās enerģētikas institūtā (FEI). Tallinā pētīti dažādi tehnoloģiskie risinājumi, kas ļautu samazināt enerģijas patēriņu pilsētas elektriskajā transportā. SC lietojums apskatīts gan mobilai, gan stacionārai EUS, taču smalkāk ir analizēts tieši mobilais EUS variants. Veikti arī ekonomiskie aprēķini, kuros novērtēts EUS atmaksāšanās laiks [21], [22]. FEI pētnieki ir izstrādājuši metodi, kas ļauj novērtēt rekuperētās un bremžu reostatos izkliedētās enerģijas daudzumu [23]. FEI darbos atspoguļots, kā no EUS jaudas spējas un enerģijas ietilpības mainās atgūstamās enerģijas daudzums [24].

1. Bremzēšanas enerģijas atgūšanas tehnoloģijas pilsētas elektriskā transporta sistēmās

1.1. Komercializētās enerģijas uzkrāšanas sistēmas

Šobrīd ir pieejamas dažādas tehnoloģijas, ko var izmantot, lai atgūtu bremzēšanas enerģiju, taču tās joprojām ir reti sastopamas elektriskā transporta sistēmās. 1. tabulā ir apkopota informācija par dažādu ražotāju bremzēšanas enerģijas atgūšanas iekārtām un to uzstādīšanas piemēriem.

1. tabula

Komerciālās bremzēšanas enerģijas atgūšanas iekārtas

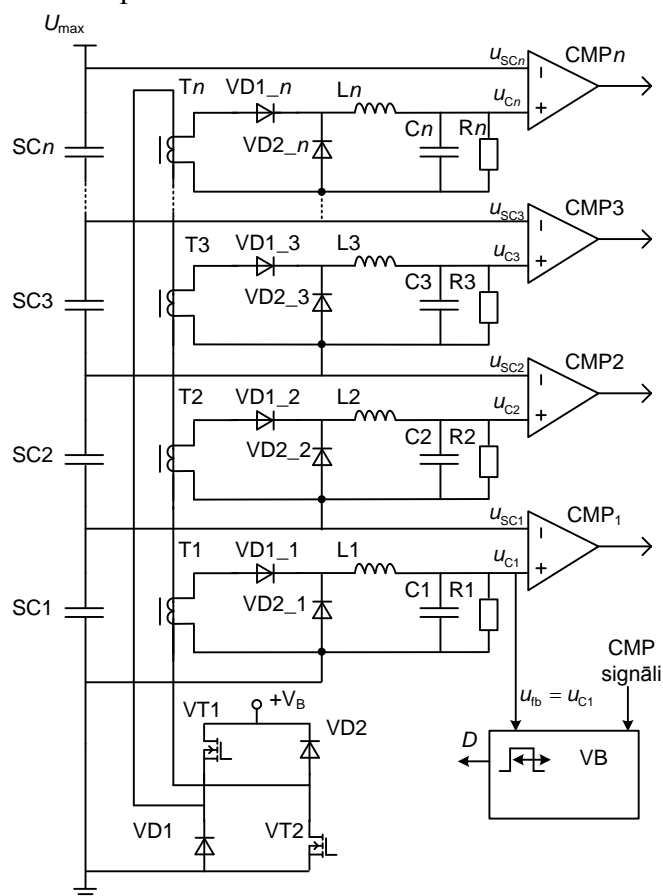
Tehnoloģija	Ražotājs	Preču zīme	Lietojuma piemēri	Atsauces
Spararati	«Piller Power Systems»	<i>Powebridge</i>	Hannovere, Hamburga, Renna	[25], [26]
	«Calnetix»	<i>Vycon® Regen®</i>	Losandželosa	[27]
Litija-jonu akumulatori (stacionāri)	«SAFT»	<i>Intensum Max</i>	Filadelfija	[28]
	«Toshiba»	<i>TESS</i>	Tokija	[29]
	«Hitachi»	<i>B-Chop</i>	Kobe, Makao, Honkonga	[25], [30]
Ni-MH akumulatori	«Kawasaki»	<i>BPS</i>	Osaka, Tokija Hokaido	[25], [31]
Superkondensatori	«Siemens»	<i>Sitras SES</i>	Madride, Ķelne, Pekina, Nirnberga, Roterdama, Toronto, Portlenda	[32], [33]
	«ABB»	<i>Enviline</i>	Filadelfija, Varšava	[25], [34]
	«Adetel»	<i>NeoGreen Power</i>	Liona	[25]
	«Woojin»	<i>Seula</i>	—	[35], [36]
	«Meidensha Cooperation»	<i>CapaPost</i>	Japāna	[25], [37]
Reversīvās apakšstacijas	«Siemens»	<i>Sitras TCI</i>	Oslo, Singapūra	[25], [38]
	«ABB»	<i>Enviline ERS</i>	Lodza	[25]
	«Alstom»	<i>HESOP</i>	Parīze, Londona, Milāna	[39]
	«Ingeteam»	<i>Ingeber</i>	Bilbao, Malaga, Brisele, Bifelde	[40]–[43]

1.2. Superkondensatoru sprieguma mērīšanas sistēma

Kā redzams 1.1. att., piedāvātais sprieguma mērīšanas paņēmiens balstīts uz tiešā pieslēguma impulsregulatora (*forward*) izmantošanu, kam ir n transformatori ar kopīgu primāro tinumu un vienādu vijumu skaitu visos sekundārajos tinumos.

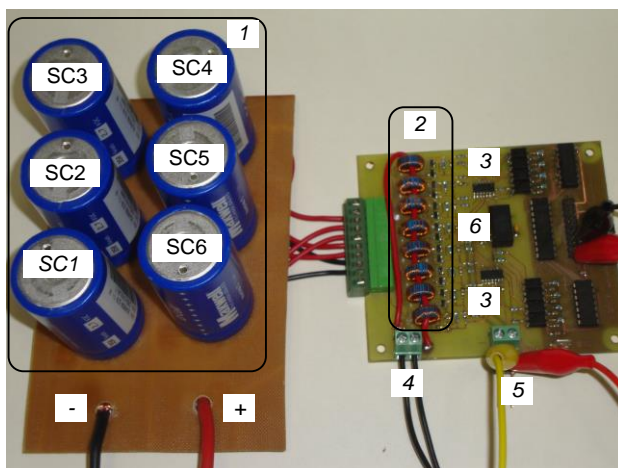
Vadības blokā VB tiek iestatīts atbalsta spriegums u_{ref} , ar kuru salīdzina katra SC spriegumu. Lai u_{ref} padotu uz filtra kondensatoriem $C1-Cn$, ir ieviesta sprieguma atgriezeniskā saite no viena filtra kondensatora. Salīdzinot atgriezeniskās saites signālu u_{fb} ar atbalsta spriegumu, ar proporcionāli integrējošā kontrolera palīdzību tiek mainīts aizpildījuma koeficients D tranzistoru VT1 un VT2 vadības signālam. Izmantojot komparatorus $CMP1-CMPn$, katra filtra kondensatora spriegums ($u_{C1}-u_{Cn}$) tiek salīdzināts ar atbilstošā SC spriegumu ($u_{SC1}-u_{SCn}$). Ja kāda SC spriegums ir lielāks nekā u_{ref} ,

atbilstošā komparatora izejā ir zema līmeņa signāls «0». Komparatoru izejas signāli ir jāfiltrē, lai novērstu svārstības. Pēc tam nofiltrētais signāls caur izolētu komunikāciju ir jāpārsūta uz vadības bloku, taču šie jautājumi šeit netiek apskatīti.



1.1. att. Virknē slēgtu SC sprieguma mērīšanas sistēma

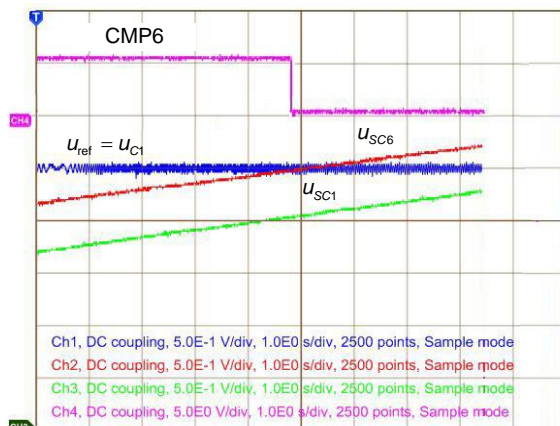
Lai pārbaudītu piedāvātā sprieguma mērīšanas paņēmiena funkcionalitāti, tika izveidots mērīšanas sistēmas prototips, kas tika darbināts sistēmā, kas daļēji apskatāma 1.2. att.



1.2. att. Sprieguma mērīšanas sistēmas prototips un SC baterija (1 — SC baterija; 2 — transformatori un sprieguma filtri; 3 — komparatori; 4 — ieejas signāls no tilta; 5 — izolēto līdzstrāvas impulsregulatoru barošana; 6 +/-15 V izolētie līdzstrāvas impulsregulatori komparatoru barošanai)

1.3. att. redzami mērījumu rezultāti eksperimentam, kas demonstrē, kā komparatoru izejā mainās signāla vērtība, tiklīdz kāds SC ir sasniedzis maksimāli pieļaujamo vērtību. Eksperimentā tika

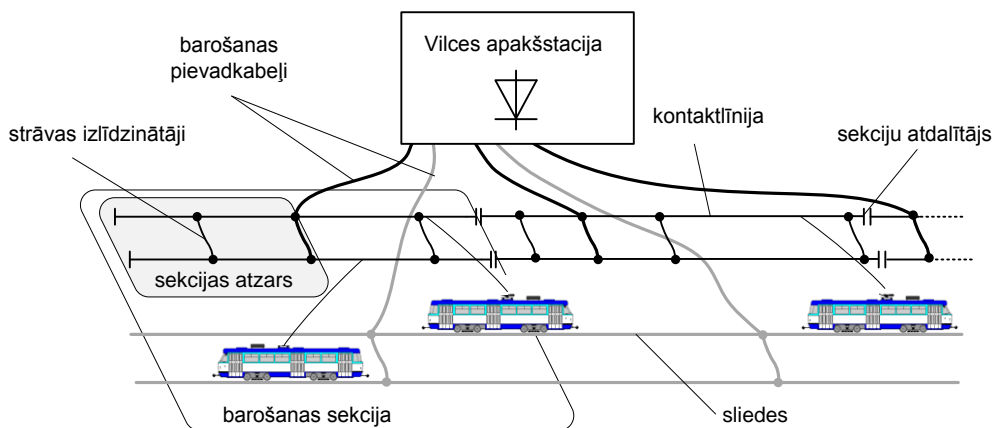
mērīti četri signāli: CMP6 — izejas signāls komparatoram, kas mēra SC ar augstāko potenciālu ($SC6$), u_{C1} — atbalsta spriegums uz filtra kondensatora ar mazāko potenciālu, u_{SC6} un u_{SC1} sestā un pirmā SC spriegums.



1.3. att. Sprieguma mērīšanas sistēmas darbības pārbaude

2. Pilsētas elektriskā transporta sistēmas ar enerģijas uzkrājējiem modelēšana

2.1. att. redzama pilsētas elektriskā transporta barošanas sistēma ar radiālu topoloģiju. Elektriskā transporta barošanas sistēma ir sadalīta pa vairākām barošanas sekcijām, kas tipiski ir nepilnu kilometru garas. Katra sekcija sākas un beidzas ar strāvu nevadošiem posmiem (sekciju atdalītājiem). Katru sekciju baro viens vai vairāki pievadkabeļi, kas kontakttīklu savieno ar apakšstaciju. Lai mazinātu sprieguma kritumu kontaktlīnijā, kas rodas, transportlīdzeklim attālinoties no pievadkabeļa pieslēguma vietas, tiek izmantoti strāvas izlīdzinātāji. Strāvas izlīdzinātāji savieno abu kustības virzienu kontaktlīnijas, tādā veidā samazinot kopējo kontaktlīniju pretestību.

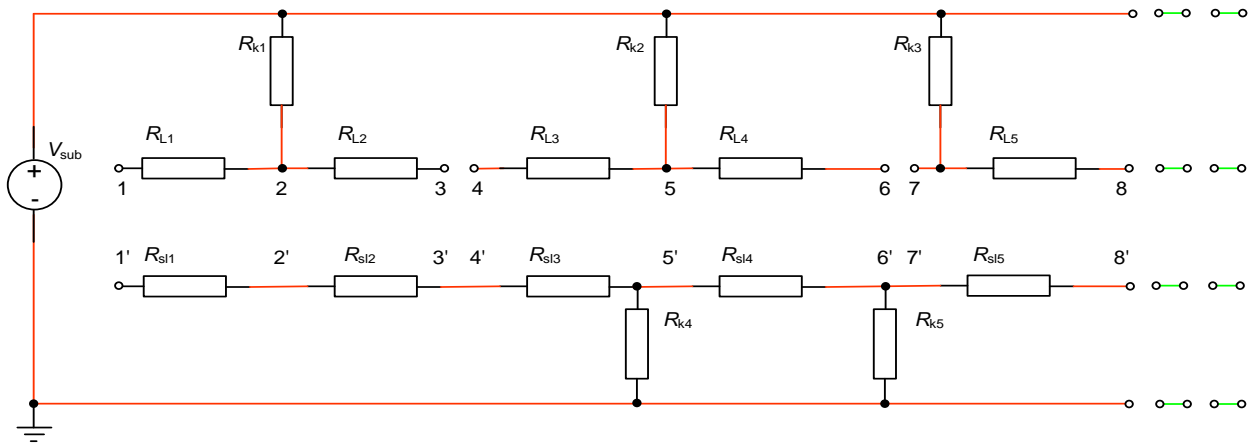


2.1. att. Pilsētas elektriskā transporta sistēma ar radiālu barošanas topoloģiju

2.1. Metode tramvaju elektriskā tīkla aizvietošanas modeļa iegūšanai

Transportlīdzekļa barošanas ķēdes elektriskā pretestība, tam pārvietojoties, ir mainīgs lielums. Vismazākā tā ir pievadkabeļa pieslēguma vietā un pieaug, attālinoties no tās. Lai vienkāršotu kontaktlīniju modelēšanu, tiek piedāvāta metode ar 5 etapiem, kuros nepieciešams izmantot kādu no elektrisko shēmu modelēšanas programmām, piemēram, *PSIM*.

1. Izveido ekvivalento shēmu (2.2. att.). Posmus no sekciju galiem līdz kabeļu pieslēguma vietām aizvieto ar ekvivalentām kontakttīkla pretestībām R_L «+» vadā un ekvivalentām sliežu pretestībām R_{sl} «-» vadā.

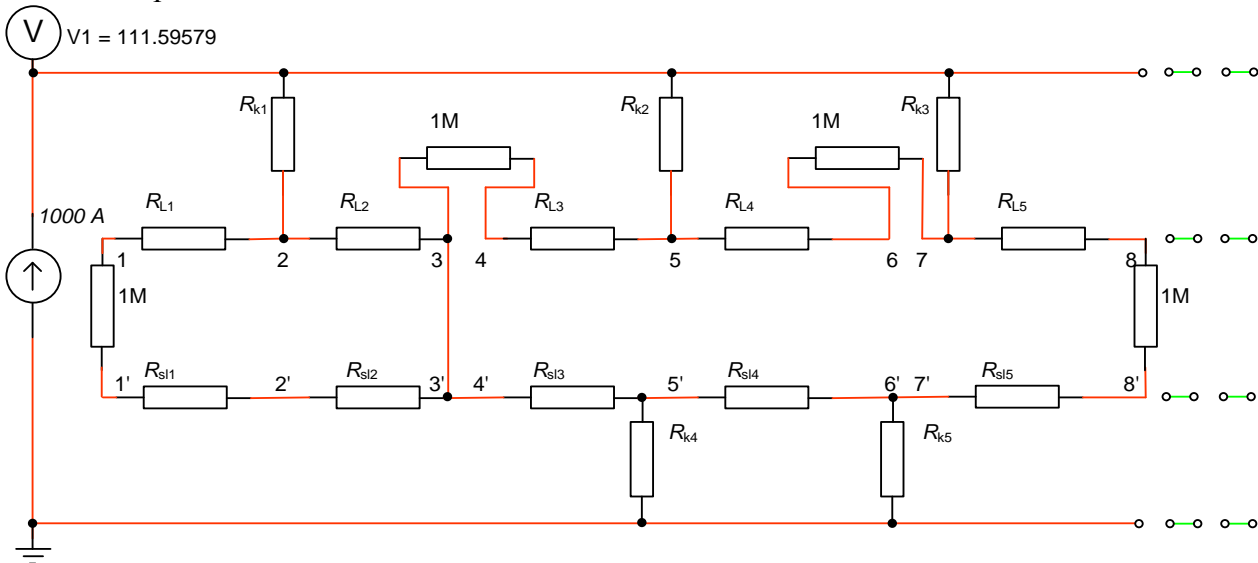


2.2. att. Tramvaja līnijas ekvivalentā shēma

2. Aprēķina ekvivalentās shēmas pretestības. Barošanas pievadabeļu (R_{k1} – R_{k5}) pretestības aprēķina, pareizinot kabeļa garumu ar tā garuma pretestību (Ω/km).

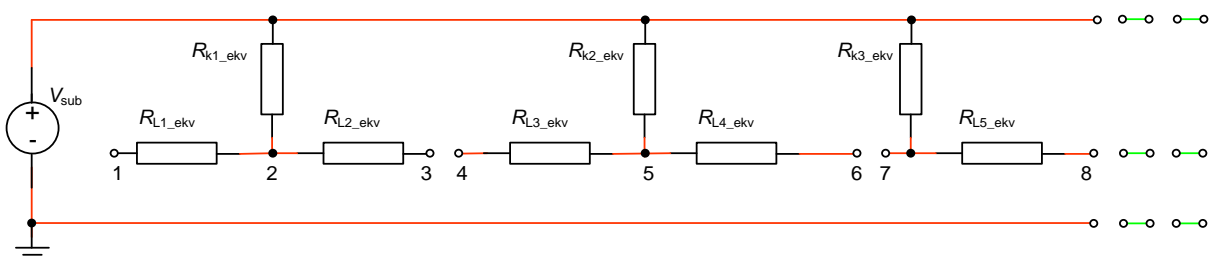
Kontakttīkla pretestības aprēķina, sareizinot posmu garumus ar $\rho = 0,088 \Omega/\text{km}$, kas atbilst MKP-100 markas divu kontaktvadu paralelslēgumam (tiek pieņemts, ka strāvas izlīdzinātāji ir abos posmu galos). Sliežu pretestības aprēķina, sareizinot posmu garumus ar $0,0135 \Omega/\text{km}$, kas atbilst divu sliežu pretestību paralelslēgumam.

3. Nosaka ekvivalentās pretestības starp mezglu punktiem 1–1', 2–2' utt. To visērtāk izdarīt, apakšstacijas sprieguma avotu nomainot ar strāvas avotu un pieslēdzot voltmetru V1, kā tas parādīts 2.3. att. Veidojot īsslēgumu pēc kārtas starp mezglu punktiem 1–1'; 2–2' utt. (pa vienam), nosaka ekvivalentās pretestības starp šiem punktiem. Ja strāvas avota strāva ir 1000 A, voltmetra V1 rādījums ir vienāds ar pretestību miliomos.



2.3. att. PSIM shēma posmu ekvivalento pretestību noteikšanai

4. Izveido kontakttīkla ekvivalento shēmu ar pretestībām «+» vadā (2.4. att.).



2.4. att. Tramvaju kontakttīkla ekvivalentā shēma ar pretestībām «+» vadā

5. Aprēķina ekvivalentās pretestības no izteiksmēm, kas dotas 2. tabulā.

2. tabula

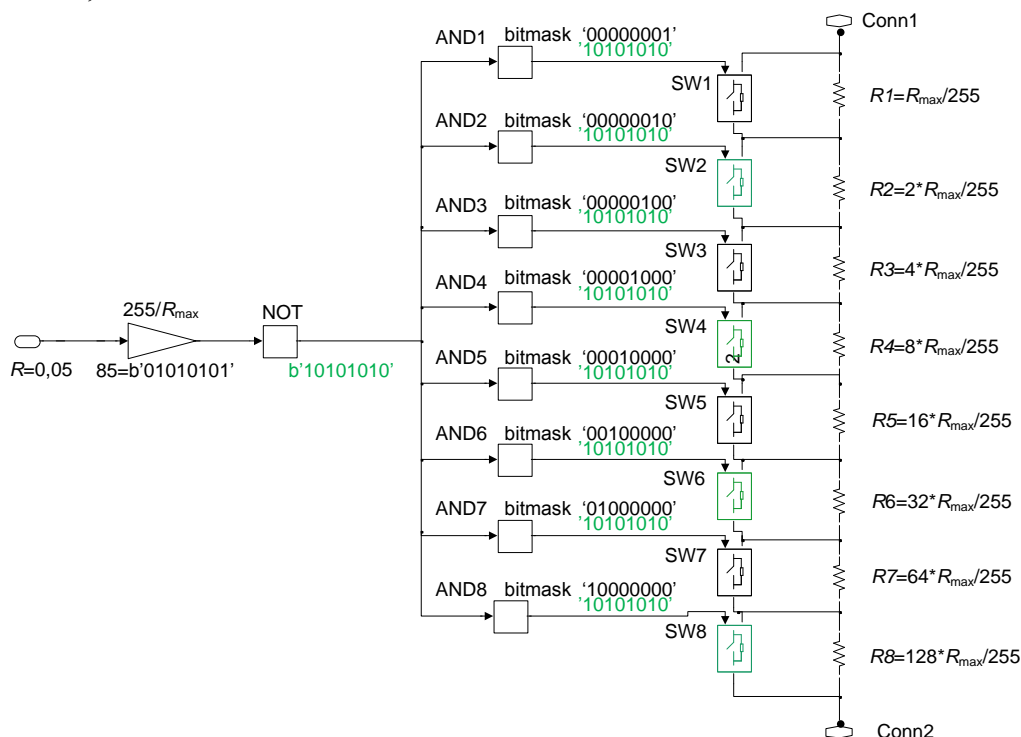
Ekvivalento pretestību aprēķins

Pretestība	R_{k1_ekv}	R_{k2ekv}	R_{k3ekv}	R_{L1_ekv}	..	R_{L5_ekv}
Vērtība	$R(2-2')$	$R(5-5')$	$R(8-8')$	$R(1-1')-R(2-2')$..	$R(8-8') - R(7-7')$

2.2. Elektriskā transporta sistēmas modelēšana *Matlab/Simulink* vidē

Mainīgas pretestības modelis kontakttīkla modelēšanai

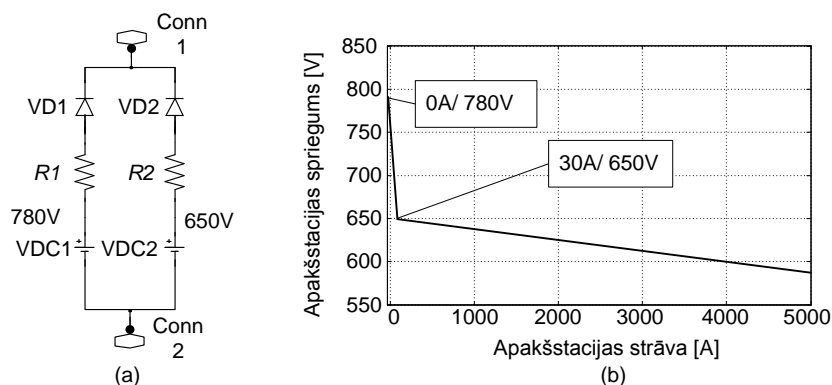
Mainīgas pretestības modelēšanai ir nepieciešams reostats, kam modelēšanas gaitā var mainīt pretestību. Taču šāda elementa *Matlab/Simulink* vidē nav, tādēļ tiek piedāvāts reostatu izveidot no rezistoru matricas, kā tas redzams 2.5. att.



2.5. att. Mainīgas pretestības kontakttīkla *Simulink* modelis

Apakšstacijas modelis

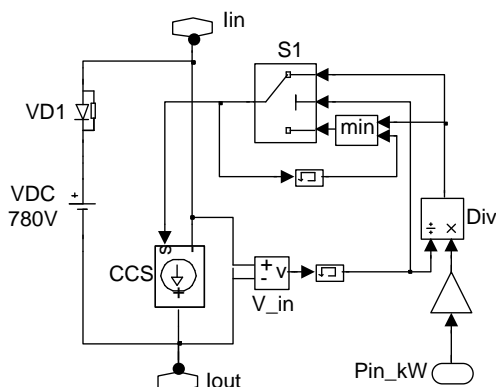
Lai apakšstacijas modelis būtu ātrdarbīgs, vilces apakšstacijai ir izveidots vienkāršots modelis, kas ļauj iegūt sešfāžu taisngrieža ar izlīdzinošo reaktoru VA raksturliķni. Modelis un tā raksturliķne ir redzami 2.6. att.



2.6. att. *Simulink* modelis apakšstacijai un modeļa voltampēru raksturliķne

Tramvaja modelis

Simulink modelis tramvajam redzams 2.7. att. Modeļa pamatā ir vadāms strāvas avots CCS (*controlled current source*), kam vadības signāla vērtību nosaka tramvaja jaudas (P_{in}) dalījums ar spriegumu, kas nomērīts uz strāvas avota. Pozitīvas P_{in} vērtības atbilst tramvaja gaitas režīmam, bet negatīvas — bremsēšanai.



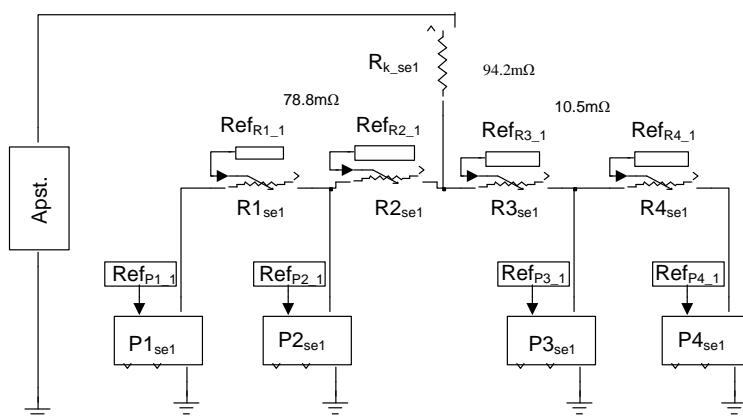
2.7. att. Simulink modelis tramvajam

Reālos tramvajos, ja spriegums tramvaja ieejā tuvojas 400 V līmenim, tramvaja vadītājam par to tiek signalizēts, un viņam ir jāsamazina tramvaja jauda, lai notiktu tramvaja atslēgšanās. Šajā modelī sprieguma nokrišana zem 400 V līmeņa novērš bloki S1 un min.

Tramvaja bremsu rezistoru impulsregulators, kas tiek iedarbināts brīžos, kad bremsēšanas režīmā spriegums tramvaja ieejā sasniedz 780 V, tiek aizstāts ar ideālu diodi VD1, kurai virknē slēgts 780 V līdzsprieguma avots VDC.

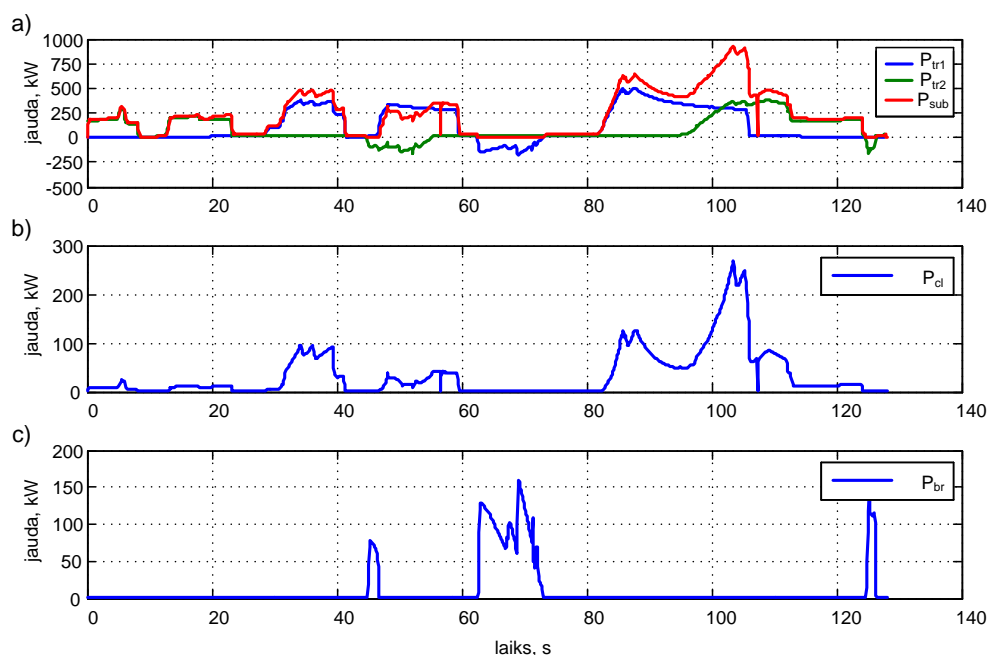
Modeļa pārbaude

Lai demonstrētu modeļa jaudu bilanci, izveidots daļējs Rīgas pilsētas 10. vilces apakšstacijas barošanas sistēmas modelis, un tas ir redzams 2.8. att.



2.8. att. Simulink modelis 10. vilces apakšstacijai posmā — Rīgas 45. vidusskola–Dzērbenes iela

Modelī bloki $R1_{se1}$, $R2_{se1}$ un $P1_{se1}$, $P2_{se1}$ aizvieto kontakttīklu un tramvajus posmā Rīgas 45. vidusskola–pievadkabeļa pieslēguma vieta, bet bloki $R3_{se1}$, $R4_{se1}$ un $P3_{se1}$, $P4_{se1}$ aizstāj kontakttīklu un tramvajus atlikušajā sekcijas apgabalā. No eksperimentāli nomērītajām diagrammām tiek izveidots scenārijs, kurā barošanas sekcijā vienlaikus atrodas divi pretimbraucoši tramvaji, un šā scenārija modelēšanas rezultāti redzami 2.9. att.



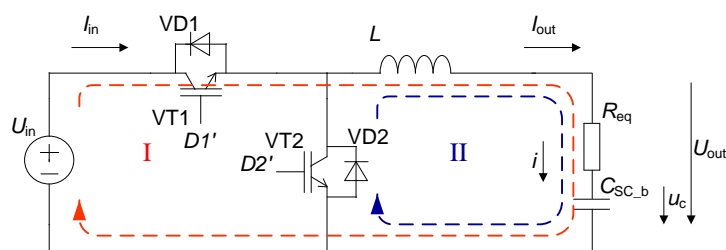
2.9. att. Modelēšanas rezultāti scenārijam, kad barošanas posmu vienlaikus šķērso divi tramvaji;
 a) tramvaju un apakšstacijas jaudu diagrammas; b) zudumu jauda kontaktlīnijās; c) bremžu rezistoros izkliedētā jauda

2.3. Analītiskais enerģijas uzkrāšanas sistēmas modelis

EUS spēka daļas aprakstīšanai ar analītiskām izteiksmēm tiek izvirzīti divi pieņēmumi;

- IGBT (*isolated gate bipolar transistor*) VT1, VT2 un diodes VD1, VD2 tiek uzskatītas par ideāliem slēdžiem, kam nav zudumu;
- enerģijas uzkrājēja ieejā ir lielas kapacitātes kondensators, kas nodrošina minimālas sprieguma pulsācijas, kas ļauj uzskatīt, ka EUS ieejā ir sprieguma avots.

Ņemot vērā šos pieņēmumus, EUS spēka daļa var tikt apskatīta kā virknē slēgta RLC ķēde, kas periodiski tiek pieslēgta sprieguma avotam vai tīsslēgta. Šajā gadījumā R_{eq} ir SC baterijas iekšējā virknes pretestība un spoles aktīvā pretestība, L — pārveidotāja spoles induktivitāte un C_{SC_b} — SC baterijas kapacitāte.



2.10. att. Spēka daļa EUS, kas sastāv no divu kvadrantu līdzstrāvas impulsregulatora un SC baterijas

Lai aprēķinātu šajā shēmā strāvu un spriegumu vērtības, shēmas darbība tiek analizēta pa laika nogriežņiem, ko nosaka pārveidotāja komutācijas periods T .

Laika intervālā $0 < t < DI \cdot T$ (IGBT VT1 ir vadošā stāvoklī) pārveidotājs darbojas spriegumu pazeminošajā režīmā, un enerģija no ieejā esošā sprieguma avota tiek nodota SC. Šajā laika intervālā R_{eq} , L un C_{SC_b} ir pieslēgti sprieguma avotam U_{in} un tiek izveidots kontūrs I. Strāvu i un spriegumu uz C_{SC_b} var aprakstīt ar vienādojumiem:

$$i(t) = e^{-bt} \left((U_{in} - U_c(0)) \frac{1}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t + I(0) \left(\cos \omega_0 t - \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right), \quad (2.1.)$$

$$u_c(t) = U_{in} - e^{-bt} \left((U_{in} - U_c(0)) \left(\cos \omega_0 t + \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) - \frac{1}{\omega_0 C_{SC_b}} I(0) \sin \omega_0 t \right), \quad (2.2.)$$

kur:

$$b = \frac{R_{eq}}{2L}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_{SC_b}} - \frac{R_{eq}^2}{4L^2}},$$

$0 < t < DI'T$ — laiks no perioda sākuma, s;

$I(0)$ — strāvas vērtība perioda sākumā, A;

$U_c(0)$ — spriegums uz superkondensatora kapacitatīvās daļas perioda sākumā, V;

DI' — IGBT VT1 aizpildījuma koeficients.

Noņemot vadības signālu no VT1, sāk vadīt diode VD2, un strāva i noslēdzas pa kontūru II. Kamēr VD2 ir vadošā stāvoklī, i un u_c vērtības var tikt aprēķinātas ar vienādojumiem:

$$i(t_2) = e^{-bt_2} \left(-U_c(DI'T) \frac{1}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t_2 + I(DI'T) \left(\cos \omega_0 t_2 - \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t_2 \right) \right), \quad (2.3.)$$

$$u_c(t_2) = -e^{-bt_2} \left(-U_c(DI'T) \left(\cos \omega_0 t_2 + \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t_2 \right) - \frac{1}{\omega_0 C_{SC_b}} I(DI'T) \sin \omega_0 t_2 \right), \quad (2.4.)$$

kur: $0 < t_2 < (1-DI')T$ ir laiks, kurā vada diode VD2.

Līdzīgi EUS darbību var aprakstīt arī izlādes režīmā jeb laikā, kad līdzstrāvas impulsregulators darbojas spriegumu paaugstinošā režīmā. Laikā, kad tranzistors VT2 ir vadošā stāvoklī, ir noslēgts strāvas kontūrs II un i un u_c vērtības nosakāmas ar vienādojumiem:

$$i(t) = e^{-bt} \left(-U_c(0) \frac{1}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t + I(0) \left(\cos \omega_0 t - \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right), \quad (2.5.)$$

$$u_c(t) = -e^{-bt} \left(-U_c(0) \left(\cos \omega_0 t + \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) - \frac{1}{\omega_0 C_{SC_b}} I(0) \sin \omega_0 t \right), \quad (2.6.)$$

kur: $0 < t < D2'T$ — laiks no perioda sākuma, s;

$D2'$ — VT2 aizpildījuma koeficients.

Kad VT2 tiek izslēgts, strāva noslēdzas pa kontūru I, un spēkā ir vienādojumi:

$$i(t_2) = e^{-bt_2} \left((U_{in} - U_c(D2'T)) \frac{1}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t_2 + I(D2'T) \left(\cos \omega_0 t_2 - \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t_2 \right) \right), \quad (2.7.)$$

$$u_c(t_2) = U_{in} - e^{-bt_2} \left((U_{in} - U_c(D2'T)) \left(\cos \omega_0 t_2 + \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t_2 \right) - \frac{1}{\omega_0 C_{SC_b}} I(D2'T) \sin \omega_0 t_2 \right), \quad (2.8.)$$

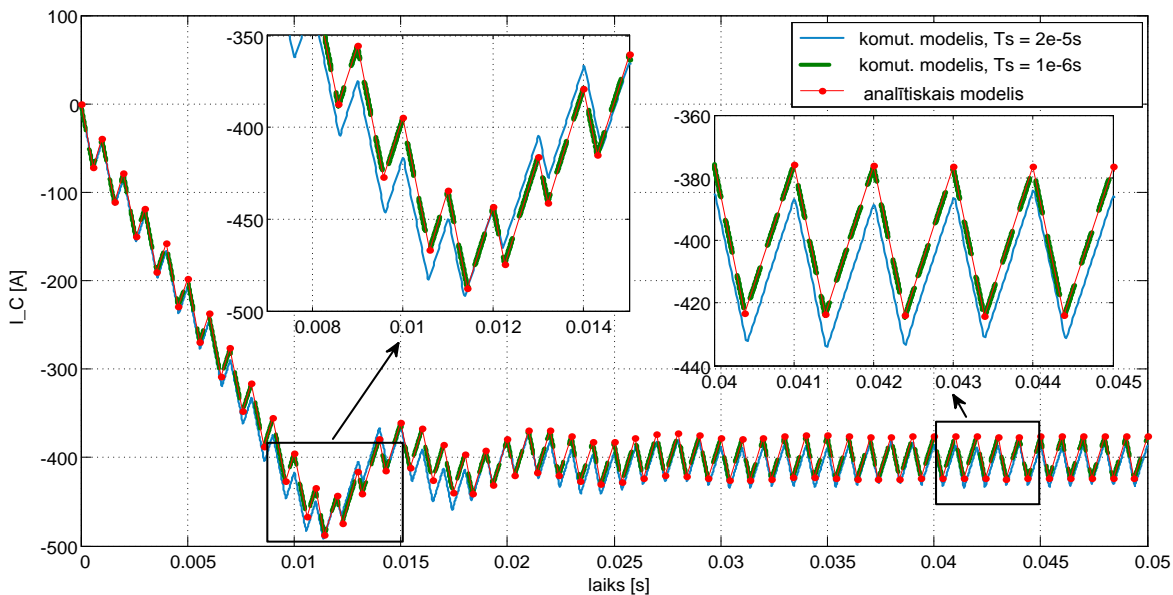
kur: $0 < t_2 < (1-D2')T$ ir laiks, kurā vada diode VD1.

Lai nodrošinātu analītiskā modeļa korektu darbību spriegumu pazeminošajā režīmā, pietiekami ir aprēķināt $i(t)$ un $u_c(t)$ vērtības laika momentos $t = DI'T$ vienādojumos (2.1.) un (2.2.) un $t_2 = (1-DI')T$ vienādojumos (2.3.) un (2.4.). Ja veido strāvas vadības saiti, tad vienādojumu (2.1.) nepieciešams vēl papildus aprēķināt laika momentā $t = DI'T/2$.

Līdzīgi arī paaugstinošajā režīmā vienādojumi (2.5.), (2.6.) tiek atrisināti laika momentam $t = D2'T$, bet vienādojumi (2.7.) un (2.8.) laika momentam $t_2 = (1-D2')T$.

Modelēšanas rezultāti

2.11. att. redzamas SC izlādes strāvas diagrammas komutāciju un analītiskajam modelim. Komutāciju modelis ar aprēķinu laika soli 20μs (lielākais solis, kas ļauj modelim stabili darboties) dod nedaudz neprecīzus rezultātus. Samazinot aprēķinu laika soli līdz 1 μs, tiek iegūta strāvas forma, kas pilnībā sakrīt ar analītisko modeli. Modelēšanai nepieciešamais laiks analītiskajam modelim ir par 75 reizes īsāks nekā komutāciju modelim.



2.11. att. Analītiskā un komutāciju modeļa salīdzinājums, kad ieejā ir sprieguma avots

3. Optimāla superkondensatoru skaita noteikšanas metode enerģijas uzkrāšanas sistēmā

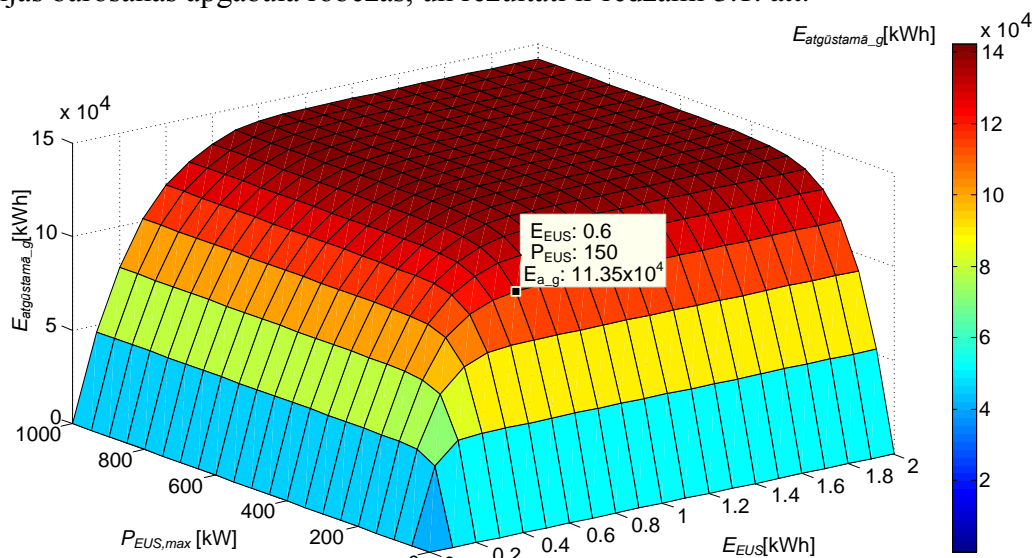
3.1. Metode, kas maksimizē stacionāras enerģijas uzkrāšanas sistēmas peļņu

Metodei ir pieci etapi, un tā var tikt izmantota gan stacionārām, gan mobilām EUS. Šeit tā tiks detalizētāk apskatīta stacionāram EUS izpildījumam. Metode tiks demonstrēta ar tās izmantošanas piemēru Rīgas 8. vilces apakšstacijai.

1. etaps

Jānoskaidro, cik daudz bremsēšanas enerģijas vienas dienas laikā var atgūt ar EUS, kurai ir noteikti jaudas un enerģijas ietilpības parametri. To ērti un ātri var izdarīt ar stohastiskās modelēšanas metodi [44].

Stohastiskā modelēšana balstīta uz jaudas tramvaja mērījumiem, kas veikti 8. apakšstacijas robežās. Ar stohastiskās modelēšanas palīdzību tiek novērtēts atgūstamās enerģijas daudzums apakšstacijas barošanas apgabala robežās, un rezultāti ir redzami 3.1. att.



3.1. att. Gada laikā atgūstamā enerģija 8. apakšstacijā atkarībā no EUS parametriem

2. etaps

Nosaka EUS nepieciešamo SC skaitu, kas nodrošina nepieciešamo EUS jaudu un enerģiju:

$$E_{EUS} = N \cdot \frac{C_{SC} \cdot U_{SC,max}^2}{2} \cdot (1-d^2), \quad (3.1.)$$

$$P_{EUS,max} = N \cdot d \cdot U_{SC,max} \cdot I_{SC,max}, \quad (3.2.)$$

kur N — SC skaits, gab;

$d = U_{SC,min}/U_{SC,max}$ — SC izlādes līmenis;

$U_{SC,max}$ — SC maksimāli pieļaujамais spriegums, V;

$U_{SC,min}$ — spriegums, līdz kuram izlādē SC, V;

C_{SC} — viena SC kapacitāte, F;

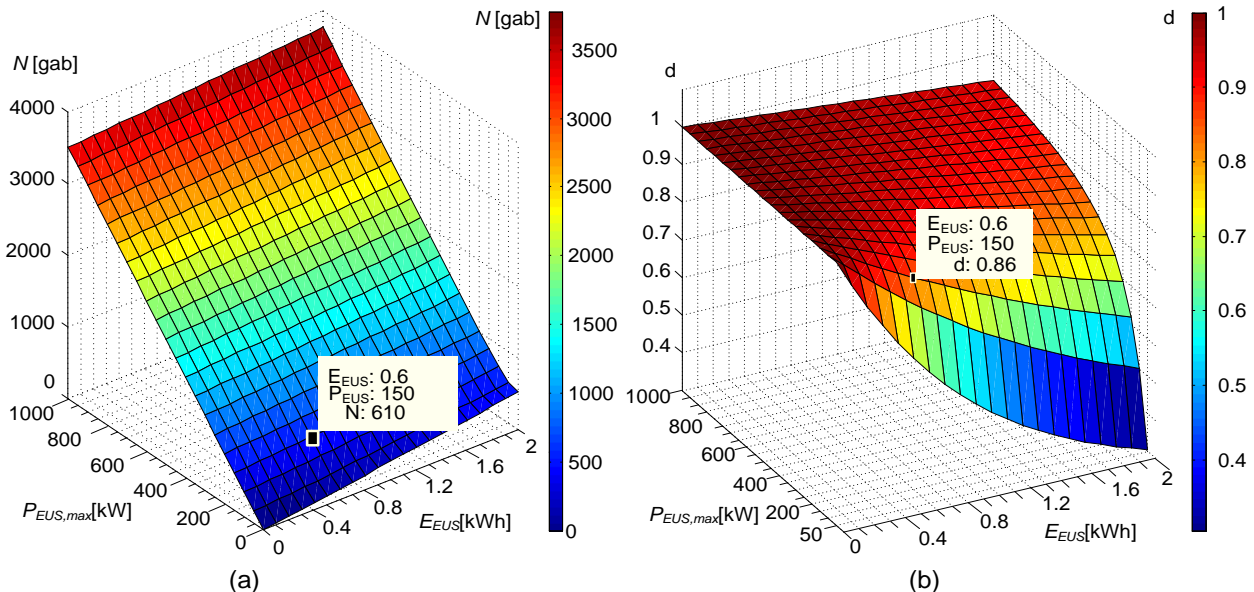
$I_{SC,max}$ — maksimālā strāvas vērtība vienam SC, A.

No (3.1.) un (3.2.) var izteikt minimāli nepieciešamo SC skaitu un optimālo izlādes līmeni, kas apmierina vēlamo E_{EUS} un $P_{EUS,max}$ kombināciju:

$$N = N_{min} = \frac{E_{EUS}}{U_{SC,max}^2 C_{SC}} + \sqrt{\left(\frac{E_{EUS}}{U_{SC,max}^2 C_{SC}}\right)^2 + \left(\frac{P_{EUS,max}}{U_{SC,max} I_{SC,max}}\right)^2}, \quad (3.3.)$$

$$d = d_{opt} = \sqrt{\left(\frac{E_{EUS} I_{SC,max}}{P_{EUS,max} U_{SC,max} C_{SC}}\right)^2 + 1} - \frac{E_{EUS} I_{SC,max}}{P_{EUS,max} U_{SC,max} C_{SC}}. \quad (3.4.)$$

SC baterijas dimensionēšanai izvēlēti SC, kuru nominālā kapacitāte ir 3400 F, bet maksimālais spriegums 2,85 V. Literatūrā [45] atrodams, ka SC ciklēšana ar lielām strāvām var novest pie to parametru pasliktināšanās pāris dienu laikā, tāpēc maksimālā SC strāva tiks izvēlēta 100 A, kas sakrīt ar ražotāju izmantoto strāvu ilgstošai SC ciklēšanai. 3.2. att (a) redzams nepieciešamais SC skaits, lai nodrošinātu vēlamos EUS parametru, 3.2. att. (b) — SC izlādes līmenis.



3.2. att. SC baterijas parametri: a) SC skaits, b) SC izlādes dziļums

3. etaps

Nosaka nepieciešamo investīciju apjomu EUS uzstādīšanai. Aplēšot potenciālo investīciju apjomu, kā izejas parametrs tiek ņemts nepieciešamais SC skaits, kas noteikts metodes 2. etapā.

SC baterijas cenu novērtēt ir relatīvi vienkārši, jo tas ir sērijveida produkts un ir zināmas cenas dažādu ražotāju SC. EUS izmantojami lieljaudas līdzsprieguma impulsregulatori un to vadība nav sērijveida produkts, tāpēc tiem cenu noteikt ir ļoti sarežģīti vai pat neiespējami. Tikpat sarežģīti ir novērtēt arī izmaksas, kas saistītas ar enerģijas uzkrājēja uzstādīšanu, jo tās atkarīgas gan no transporta, gan darbaspēka izmaksām, kas mainās atkarībā no izvēlētajā valsts, kur EUS tiks uzstādīts.

Tādēļ šajā metodē EUS uzstādīšanai nepieciešamās sākotnējās investīcijas piedāvāts tuvināti aprēķināt pēc šādas izteiksmes:

$$K_{EUS}(P_{EUS,max}, E_{EUS}) = N \cdot K_{SC} \cdot k, \quad (3.5.)$$

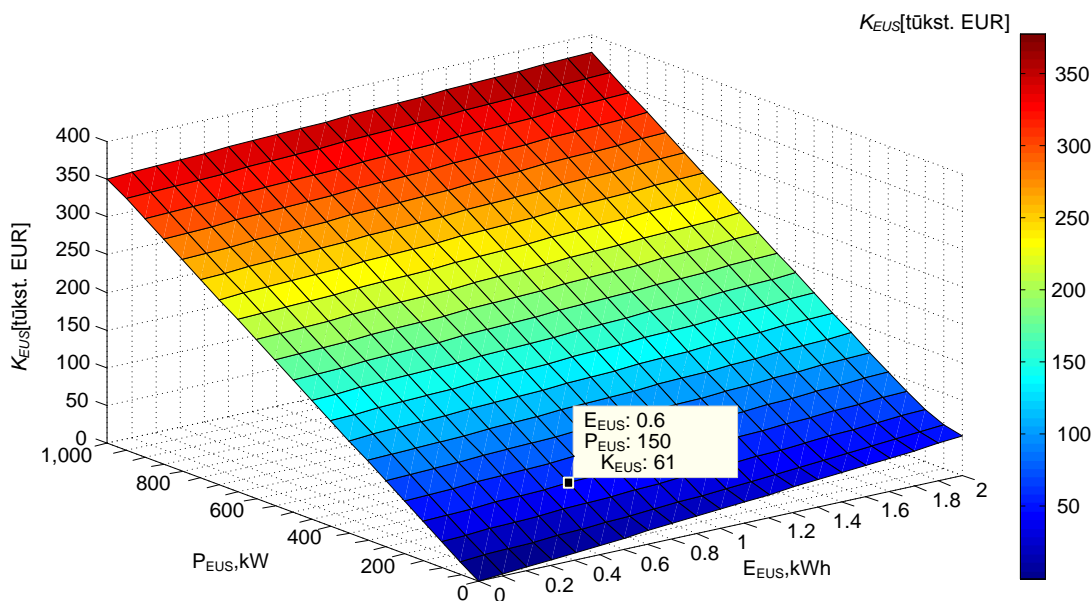
kur N — SC skaits, gab;

K_{SC} — viena SC cena, EUR;

k — koeficients, ar ko tiek reizināta SC baterijas cena. Šis koeficients ietver līdzstrāvas impulsregulatora cenu, iekārtas izveides uzstādīšanas izmaksas.

Pieeja, kurā EUS cena aptuveni tiek novērtēta ar izteiksmi (3.5.), tiek izmantota arī citu autoru pētījumos [22], kur koeficientam k ir pieņemta vērtība 2.

Šajā piemērā viena SC cena tiks pieņemta 50 EUR, bet EUS kopējās cenas aprēķinā koeficientam k tiks piešķirta vērtība 2. Rezultātā tiek iegūts EUS izmaksu grafiks, kas redzams 3.3. att.



3.3. att. Dažādu EUS uzstādīšanai nepieciešamais investīciju apjoms

4. etaps

Aprēķina naudas patreizējo vērtību potenciāli atgūstamajai bremsēšanas enerģijai SC kalpošanas mūža laikā dažādām $P_{EUS,max}$ un E_{EUS} kombinācijām:

$$PV(z, T_{SC,m}) = \sum_{t=0}^{t=T_{SC,m}} \frac{E_{atgustama_g}(E_{EUS}, P_{EUS,max}) K_{el}}{(1+z)^t}, \quad (3.6.)$$

kur $PV(z, T_{SC,m})$ — naudas tagadnes vērtība elektroenerģijas daudzumam, kas tiks atgūts laika periodā, kurā SC novecosies, EUR;

z — naudas diskontēšanas likme, %;

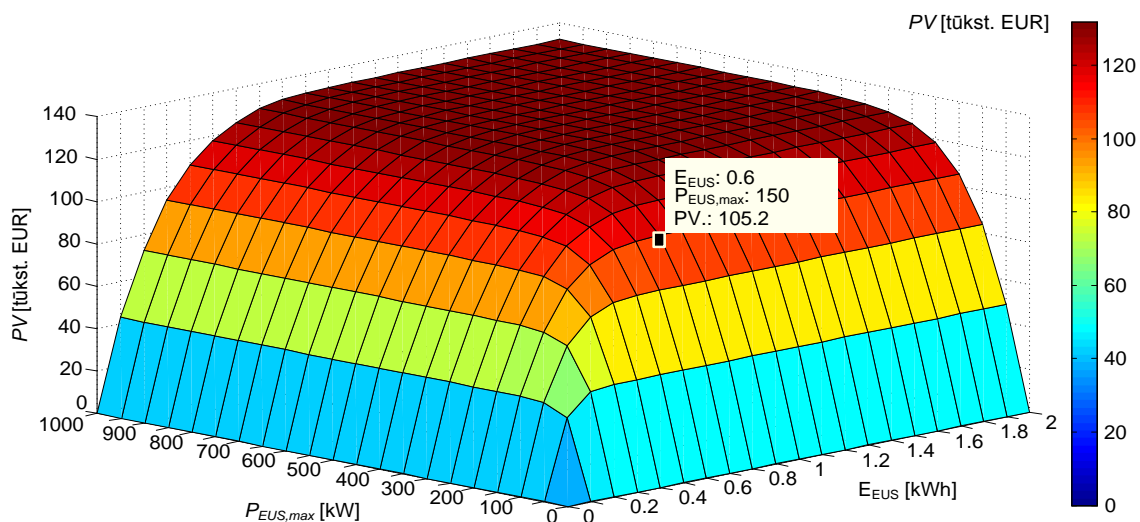
$T_{SC,m}$ — SC kalpošanas mūžs, gadi;

$E_{atgustama_g}(E_{EUS}, P_{EUS,max})$ — gada laikā atgūstamās enerģijas daudzums, kWh;

K_{el} — elektroenerģijas cena, EUR/kWh;

t — gads, par kuru tiek veikts aprēķins.

SC ražotāji produktu specifikācijā norāda 10 gadu kalpošanas mūžu, tāpēc šis laiks tiks apskatīts, kā laika posms, kam tiks aprēķināta EUS peļņa. Elektroenerģijas cena šajā piemērā pieņemta 0,1 EUR/kWh, bet diskontēšanas likme — 5 %.

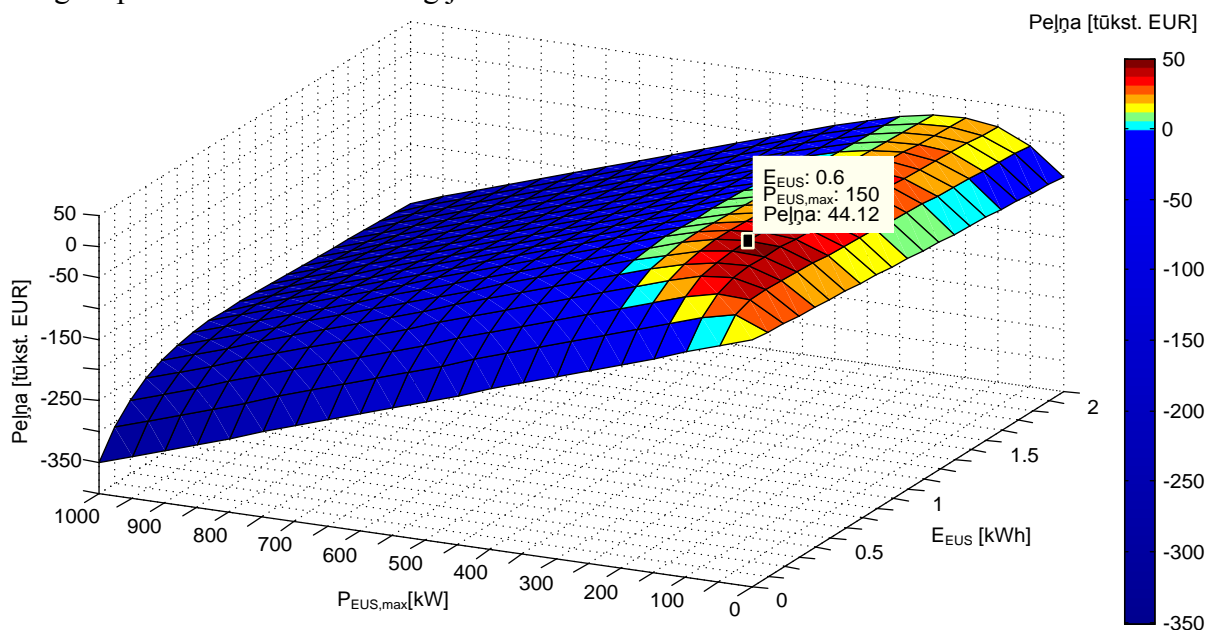


3.4. att. Atgūstamā enerģija naudas izteiksmē 8. apakšstacijai 10 gadu laikā

5. etaps

Nosaka EUS potenciālo peļņu pie dažādām $P_{EUS,max}$ un E_{EUS} vērtībām. Tas izdarāms, no 4. etapā aprēķinātajām $PV(z, T_{SC_m})$ vērtībām atņemot atbilstošās $K_{EUS}(P_{EUS,max}, E_{EUS})$ vērtības, kas iegūtas 3. etapā.

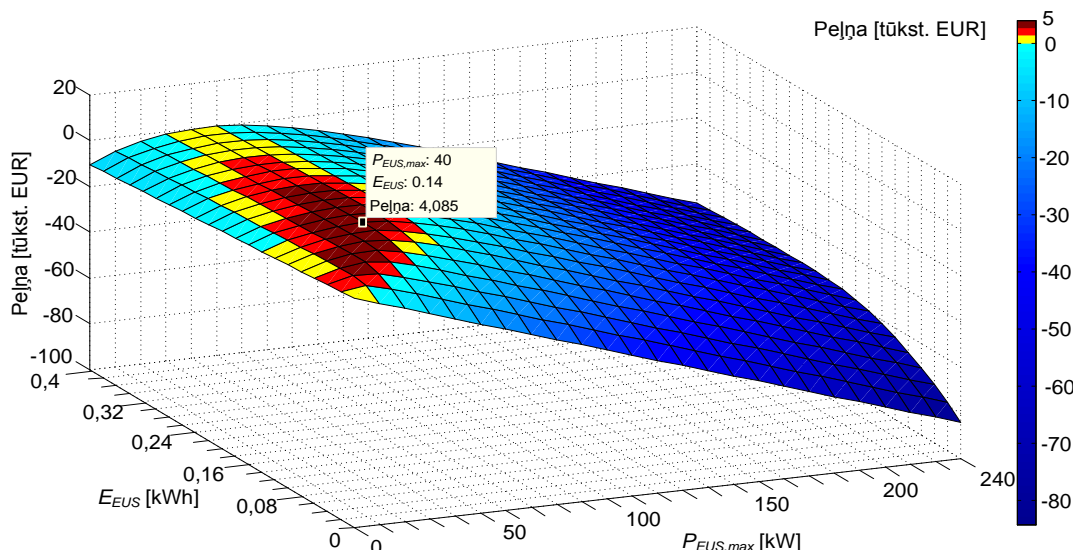
3.5. att. ar tumši zilo krāsu iekrāsotā virsma daļa rāda apgabalu, kurā EUS uzstādīšana nestu zaudējumus. Attēlā arī redzams, ka EUS ar jaudu $P_{EUS,max} = 150$ kW un enerģijas ietilpību $E_{EUS} = 0,6$ kWh ir maksimuma punkts. Šāds EUS 10 gadu griezumā dotu 44 000 EUR peļņu. Apskatot šo punktu iepriekšējo etapu attēlos, var noteikt, ka šāda EUS jāveido no 610 SC, kam jāizvēlas izlādes līmenis 0,86. Sākotnējās investīcijas šādam EUS būtu 61 000 EUR, un tas ļautu katru gadu atgūt aptuveni 113 MWh enerģijas.



3.5. att. Rīgas 8. vilces apakšstacijā uztādītu EUS potenciālā peļņa

3.2. Metodes lietojums mobilai enerģijas uzkrāšanas sistēmai

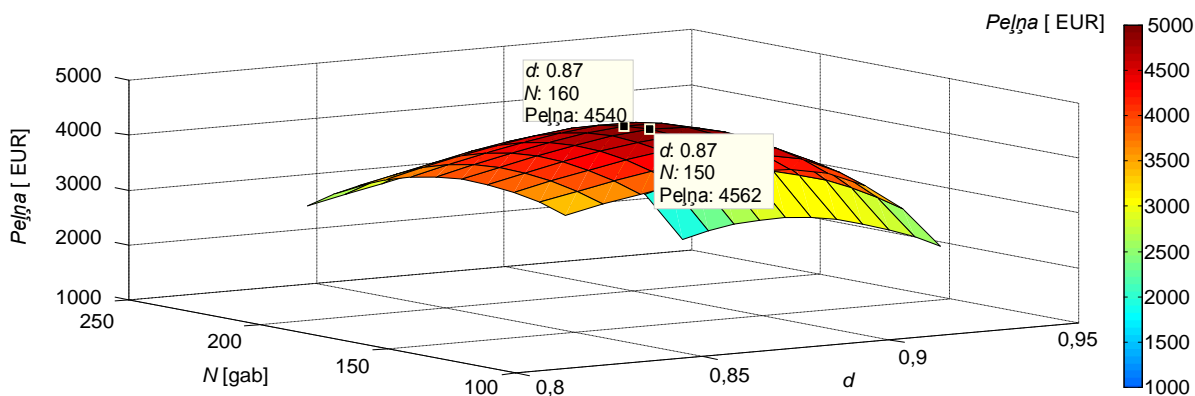
Izmantojot aprakstīto SC skaita izvēles metodi tramvajam T3A, tika iegūti rezultāti, kas redzami 3.6. att.



3.6. att. Ar dažādu EUS potenciāli iegūstamā peļņa 10 gadu periodā tramvajam T3A ($I_{SC,max} = 100$ A, $C_{SC} = 3400$ F, $V_{SC,max} = 2,85$ V, $K_{el} = 0,1$ EUR/kWh, $z = 5$ %)

EUS ar jaudu $P_{EUS,max} = 40$ kW un enerģijas ietilpību $E_{EUS} = 0,14$ kWh 10 gadu laikā dotu vislielāko peļņu, kas būtu 4085 EUR. Šādai EUS būtu nepieciešami 160 SC, kam jāzudod izlādes līmenis $d = 0,88$. Sākotnēji nepieciešamās investīcijas būtu 16 000 EUR, un šāds uzkrājējs 10 gados ietaupītu elektroenerģiju aptuveni 20 000 EUR vērtībā.

Piedāvātajā metodē tiek ņemta konstanta EUS maksimālā jauda, taču īstenībā EUS jauda ir atkarīga no SC izlādes līmeņa (skat. (3.2.)). Jo augstāks SC spriegums, jo lielāka EUS momentānā jaudas spēja pie uzdotās maksimālās SC strāvas $I_{SC,max}$. Tādēļ tika veikts EUS peļņas aprēķins, kurā ņemta vērā EUS momentānā jaudas spēja, kā arī zudumi, kas rodas SC ekvivalentās virknes pretestības dēļ. Aprēķinu rezultāti redzami 3.7. att. Šajā gadījumā maksimālā peļņa sagaidāma gadījumā, ja tiek izmantoti 150 SC, taču tā ir tikai par 22 EUR mazāka nekā ar 160 SC, tāpēc var uzskatīt, ka ar piedāvāto metodi noteiktais SC skaits ir optimāls.



3.7. att. Ar dažādu EUS potenciāli iegūstamā peļņa 10 gadu laikā, ņemot vērā SC zudumus

4. Enerģijas uzkrāšanas sistēmu parametru ietekme uz apakšstacijas enerģijas patēriņu

4.1. Mobilo enerģijas uzkrāšanas sistēmu parametru analīze

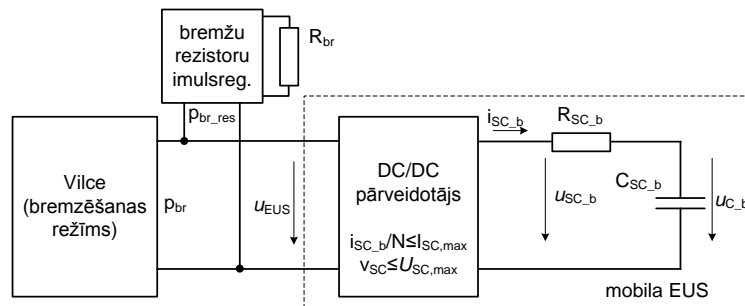
Transportlīdzekļu aprīkošana ar mobilām EUS ir visefektīvākā metode, kas ļauj uzkrāt bremzēšanas enerģiju. Taču tas ir arī visdārgākais veids, kā atgūt bremzēšanas enerģiju, jo katra EUS apkalpo tikai vienu transportlīdzekli. Tādēļ ir ļoti būtiski precīzi izvēlēties SC skaitu, ko satur EUS SC baterija, kā arī piemeklēt EUS vadības parametrus, kas dod labākos rezultātus.

Mobilo enerģijas uzkrāšanas sistēmu parametru analīze ar idealizētām jaudu diagrammām

Šajā sadaļā tiks analizēta trolejbusa Škoda 24Tr bremsēšana gadījumam, kad trolejbuss ir ar maksimālo iespējamo masu (17 t) un bremsē ar maksimālo atļauto palēninājumu (-2 m/s^2) no ātruma 50 km/h. Lietderības koeficients, ar kādu trolejbuss atgriež reģenerēto enerģiju, ir pieņemts 0,5 [46]. Ar šādiem ieejas datiem var aprēķināt, ka trolejbusa sākotnējā bremsēšanas jauda P_{br} ir 236 kW, bet bremsēšanas laikā reģenerētā enerģija $E_{br} = 820 \text{ kJ}$.

EUS darba režīmi

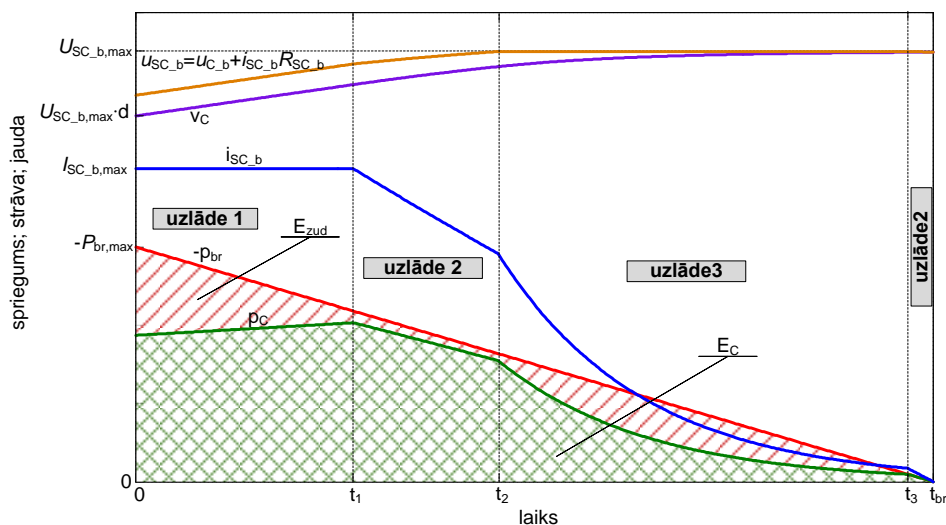
4.1. att. ir redzama blokdiagramma elektriskajam transportlīdzeklim, kas aprīkots ar EUS un atrodas bremsēšanas režīmā. Līdzstrāvas impulsregulators (DC/DC pārveidotājs) ar noteiktu lietderību η nodrošina kontrolētu enerģijas plūsmu no transportlīdzekļa uz SC bateriju.



4.1. att. Ar mobilu ESS aprīkota elektriskā transportlīdzekļa blokdiagramma

4.2. att. redzamas mobilās bremsēšanas enerģijas uzkrāšanas iekārtas darbības raksturliķnes gadījumam, kad transportlīdzeklis laika intervālā $0-t_{br}$ lineāri samazina bremsēšanas jaudu p_{br} no maksimālās vērtības $P_{br,max}$ līdz 0. EUS darbībā ir trīs režīmi:

- uzlāde1 — novērojams laika intervālā $0-t_1$, kad bremsēšanas jauda p_{br} pārsniedz EUS jaudas spēju, ko nosaka maksimālā strāvas ierobežošana. Šajā režīmā daļa no p_{br} tiek izkliedēta bremsēšanas rezistoros;
- uzlāde2 — režīms, kad visa bremsēšanas enerģija (atskaitot enerģijas zudumus pārveidotājā un SC virknes pretestībās) tiek uzkrāta SC baterijā;
- uzlāde3 — norisinās laika intervālā t_2-t_3 . Šajā režīmā tiek stabilizēts SC baterijas spriegums līmenī $u_{sc_b} = const = U_{sc_b,max}$.



4.2. att. Trīs iespējamie darba režīmi mobilajai EUS

SC skaita izvēles apsvērumi

Lai bremsēšanas enerģiju netiktu kļiedēta bremsžu rezistoros, ir jābūt spēkā šādām nevienādībām:

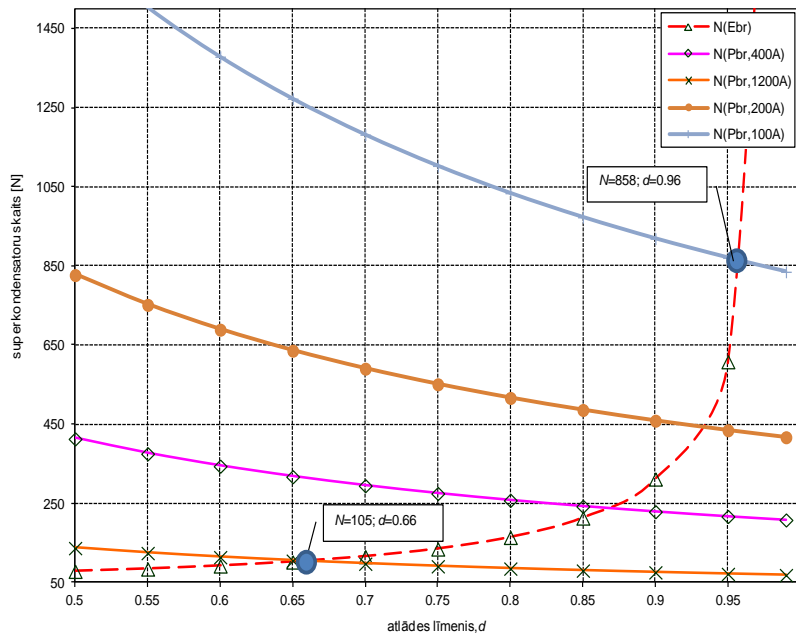
$$E_{EUS} \geq E_{br}; P_{EUS,max} \geq P_{br,max}. \quad (4.1.)$$

Ievietojot (4.1.) vienādojumos (3.1.) un (3.2.), var uzrakstīt nevienādības, kas nosaka SC skaitu:

$$N \geq \frac{2E_{br}}{U_{SC,max}^2 C_{SC}(1-d^2)}, \quad (4.2.)$$

$$N \geq \frac{P_{br,max}}{V_{SC,max} I_{SC,max} d}. \quad (4.3.)$$

4.3. att. parāda, kā nepieciešamais SC skaits ir atkarīgs no SC izlādes līmeņa pie dažādām $I_{SC,max}$ vērtībām. Attēlā redzamās līknes iegūtas ar (4.2.) un (4.3.) ar šādiem ieejas parametriem: $E_{br} = 820$ kJ, $P_{br,max} = 236$ kW, $C_{SC} = 3400$ F un $U_{SC,max} = 2,85$ V. Līkne $N(E_{br})$ ir iegūta no (4.2.) un ataino N atkarību no d , ņemot vērā tikai enerģijas ietilpības nosacījumu.



4.3. att. Nepieciešamais SC skaits N , lai uzkrātu bremsēšanas enerģiju bremsēšanas profilam ar $P_{br,max} = 236$ kW un $E_{br} = 820$ kJ pie dažāda izlādes līmeņa d un dažādām SC maksimālās strāvas vērtībām

Nepārtrauktās līknes $N(P_{br})$ 4.3. att. iegūtas ar (4.3.) pie dažādām SC maksimālās strāvas vērtībām: $I_{SC,max} = 100, 200, 400$ un 1200 A. Nepārtrauktās līknes parāda, kā nepieciešamo SC skaitu ietekmē tikai jaudas nosacījums. SC maksimālās strāvas vērtība 1200 A ir izvēlēta pēc sakarības: $0,12I_{isslėguma}$, kas avotos [46], [47], [48] tiek rekomendēta kā maksimālā pieļaujamā SC strāva. Jaudas spējas un enerģijas ietilpības nosacījumi tiek apmierināti, ja tiek izvēlēts SC skaits, kas atrodas gan virs enerģijas ietilpības, gan jaudas spējas līknēm. Jaudas un enerģijas līkņu krustpunkts dod minimālo N , pie kura ir spēkā abi nosacījumi. Šīs vērtības var tikt izskaitļotas ar (3.3.) un (3.4.). Ja izvēlas $I_{SC,max} = 1200$ A, visas atgūstamās bremsēšanas enerģijas uzkrāšanai pietiek ar 105 SC, kam izlādes līmenis $d = 0,66$. Izvēloties $I_{SC,max} = 100$ A, nepieciešamais SC skaits pieaug līdz 858 ar izlādes līmeni 0,96. Apskatītajā $I_{SC,max}$ strāvas diapazonā 100–1200 A optimālais izlādes dziļums ir lielāks par 0,66, kas nesakrīt ar vērtību 0,5, kas plaši minēta literatūrā, kurā tiek apskatīti jautājumi, kas saistīti ar EUS SC skaita izvēli.

Mobilo enerģijas uzkrāšanas sistēmu parametru analīze ar eksperimentāli nomērītām jaudu diagrammām

Modelis sistēmai ar mobilo EUS, kas enerģiju gan uzkrāj, gan atdod atpakaļ, ir redzams 4.4. att. Vilces apakšstacija šeit attēlota ar spriegumu avotu V_{sub} un virknē slēgtu diodi VD1. R_l aizstāj kontakttilus, barošanas pievadkabeļus un sliedes. Lai arī tramvajs nepārtraukti atrodas kustībā, kas nozīmē, ka R_l vērtība ir mainīga laikā, modeļa vienkāršības labad tiek pieņemts, ka R_l vērtība ir nemainīga laikā. Tramvaja jaudas p_{tr} pozitīvais virziens tiks saistīts ar tramvaja gaitas režīmu, bet negatīvās p_{tr} vērtības tiks saistītas ar tramvaja bremsēšanas procesu. EUS un SC baterijas jaudu (attiecīgi p_{EUS} un p_{SC_b}) pozitīvais virziens tiks asociēts ar uzlādes režīmu, bet negatīvais — ar izlādi.

ESS izlāde var notikt divos režīmos:

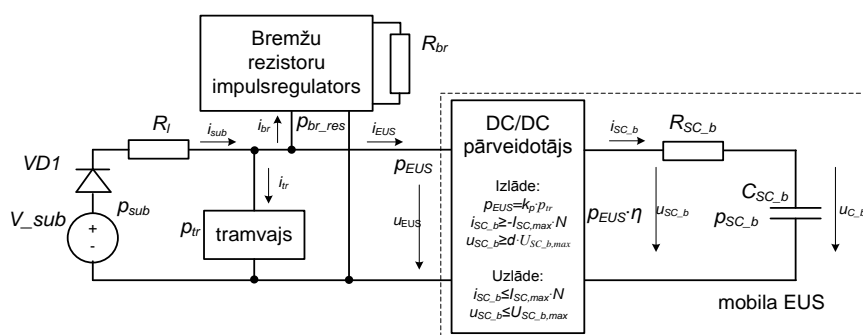
- izlāde1 — EUS tiek izlādēts ar jaudu, ko nosaka vienādojums:

$$p_{EUS} = k_p \cdot p_{tr}, \quad (4.4.)$$

kur k_p — izlādes proporcionalitātes koeficients;

- izlāde2 — režīma izlāde1 noteikto p_{EUS} jaudu EUS nevar nodrošināt, jo tas pārkāpj SC maksimālās strāvas ierobežojumu. Tāpēc no p_{EUS} tiek nodrošināts tāds jaudas līmenis, ko nosaka izteiksme:

$$p_{EUS} = I_{SC_b,max} \cdot u_{SC_b} \cdot \eta, \quad (4.5.)$$



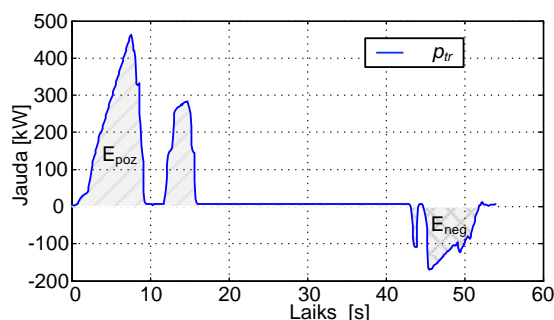
4.4. att. Ar mobilo EUS aprīkota tramvaja un tā barošanas sistēmas blokdiagramma

Ņemot vērā EUS izlādes un uzlādes režīmus, brīvi maināmie parametri, kas ļauj ietekmēt EUS jaudu un enerģijas ietilpību, ir d un k_p . Tāpēc šie parametri tiks mainīti plašā diapazonā, lai atrastu kombināciju, kurā tie dod labāko rezultātu. Turklāt katrā eksperimentā k_p un d vērtības tiks uzturētas konstantas, un tādēļ šo vadības metodi saucim par konstanto parametru metodi. Rezultātu novērtēšana notiks ar relatīvu mērvienību, kas parāda, par cik procentiem EUS ar konkrētiem parametriem samazinās enerģijas patēriņu no apakšstacijas attiecībā pret situāciju, kurā tramvajs nav aprīkots ar EUS:

$$E_{sub_r} = \frac{E_{sub0} - E_{sub}}{E_{sub0}} 100 \%, \quad (4.6.)$$

kur E_{sub0} — enerģijas patēriņš no apakšstacijas, kad tramvajs nav aprīkots ar mobilo EUS;
 E_{sub} — enerģijas patēriņš no apakšstacijas, kad tramvajā ir uzstādīta EUS.

Lai samazinātu enerģijas daudzumu, kas tiek zaudēts bremžu rezistoros, kad EUS tiek lādēta uzlādes režīmos uzlāde1 vai uzlāde3, SC baterijai pirms katras bremsēšanas sākuma ir jābūt izlādētai līdz sprieguma līmenim, kas nodrošina EUS stāvokli, kurā tas spēj uzkrāt tieši tik enerģijas, cik nākamajā bremsēšanas procesā tiks rekuperēts. Tas nozīmē, ka konkrētam bremsēšanas profilam tiks nodrošināta ne tikai pietiekama EUS uzkrājamās enerģijas rezerve, bet arī EUS maksimālā jauda. Šādu vadības metodi, kurā jaudas profils ir iepriekš zināms, saucim par mainīgo metodi. Lai šo vadības metodi pārbaudītu, iepriekš reģistrētos tramvaja jaudas profilus nepieciešams sadalīt posmos, kur katrs posms sākas laika momentā, kad tramvajs sāk kustību, bet beidzas brīdī, kad tramvaja ātrums ir atkal nokritis līdz 0 km/h. Viena šāda posma jaudas profils redzams 4.5. att.



4.5. att. Tramvaja jaudas profils, kas atbilst vienai paātrināšanai un bremsēšanai

Enerģijas daudzums, ko tramvajs patērēs vienas ieskriešanās laikā E_{poz} , un enerģija, ko tas reģenerēs E_{neg} , ir viegli nosakāma, integrējot attiecīgo jaudas profila daļu, tāpēc var noteikt nepieciešamo SC izlādes līmeni un jaudas proporcionalitātes koeficientu, kas nodrošinās EUS darbību ar mainīgo parametru metodi:

$$d = \frac{\sqrt{U_{SC_b,max}^2 - \frac{2E_{neg}}{C_{SC_b}}}}{U_{SC_b,max}}, \quad (4.7.)$$

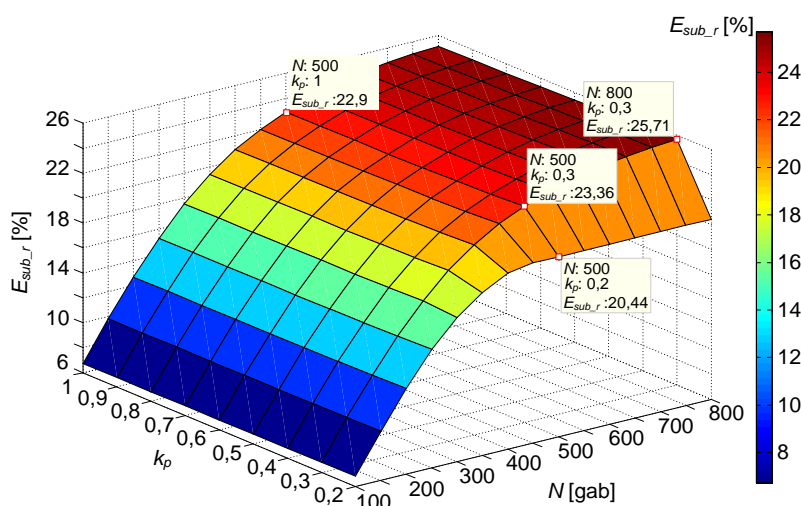
$$k_p = \frac{E_{neg}}{E_{poz}}. \quad (4.8.)$$

Lai arī šādu vadības metodi reālai EUS tramvaja jaudas varbūtējā rakstura dēļ nav iespējams nodrošināt, rezultāti, ko šī metode dos, tiks izmantoti, lai novērtētu konstanto parametru metodes efektivitāti.

Modelēšanas rezultāti

Apskatāmās sistēmas matemātiskais modelis izveidots *Matlab* vidē kā algoritms, kas iteratīvi veic sistēmas elektrisko parametru skaitļošanu, mainot ieejas parametru p_{tr} .

4.6. att. redzami aprēķinu rezultāti, kuros tika mainīts SC skaits un EUS vadības parametri k_p un d . Pie dažāda SC skaita un izvēlētās k_p vērtības tika atrasts SC izlādes optimālais līmenis.



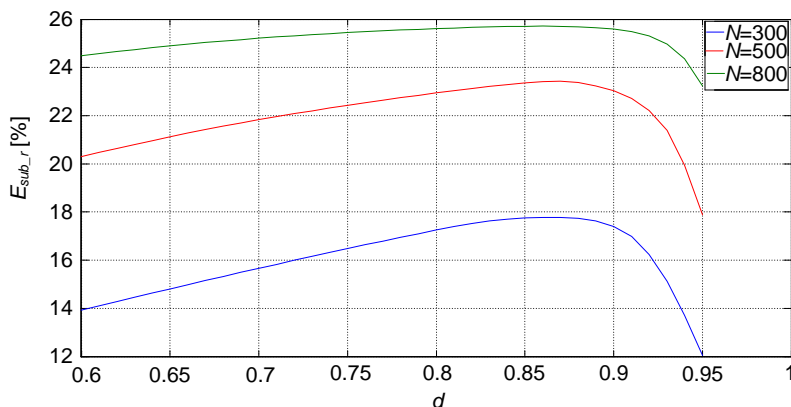
4.6. att. Mobilas EUS ietekme uz apakšstacijas enerģijas patēriņa samazinājumu ($I_{SC,max} = 100$ A)

Kā redzams, mainot k_p vērtību robežās no 0,3 līdz 1, enerģijas patēriņš no apakšstacijas būtiski nemainās. Taču, ja k_p vērtība tiek ņemta mazāka par 0,3, E_{sub_r} sāk strauji mazināties. Piemēram, izvēloties $N = 500$ un mainot k_p no 0,3 līdz 1, E_{sub_r} samazinās tikai par 0,5 %, taču pie $k_p = 0,2$ enerģijas patēriņš no apakšstacijas attiecībā pret situāciju, kurā $k_p = 0,3$, pieaug aptuveni par 3 %.

4.6. att. atspoguļotie rezultāti uzskatāmi arī parāda, kā E_{sub_r} ir atkarīgs no izvēlētā SC skaita. Pieaugot SC skaitam ir pašsaprotami, ka pieaug arī ietaupītās enerģija daudzums, taču šis pieaugums

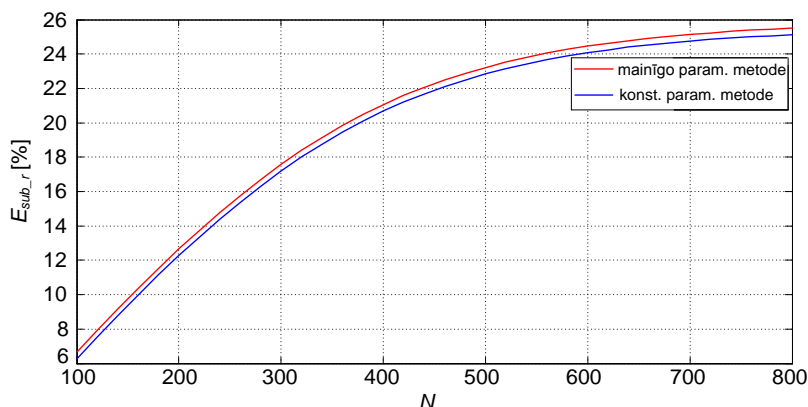
nav lineāri atkarīgs no SC skaita. Izmantot vairāk par 500 SC nebūtu nepieciešams, jo, palielinot SC skaitu no 500 līdz 800, ietaupītās enerģijas daudzums palielinās tikai par 2 %.

4.7. att. redzams, kā d ietekmē $E_{sub,r}$ pie dažāda SC skaita un pie konstanta $k_p = 0,3$. $E_{sub,r}$ maksimālās vērtības tiek sasniegtas, kad d izvēlas aptuveni 0,87. Jo mazāks SC skaits, jo lielāka d ietekme ir uz $E_{sub,r}$. Ja tiek izvēlēta pārāk maza d vērtība, EUS sāk darboties uzlāde1 režīmā, savukārt, ja d vērtība ir lielāka par 0,9, $E_{sub,r}$ samazinās, jo EUS darbojas uzlāde3 režīmā.



4.7. att. EUS izlādes līmeņa ietekme uz $E_{sub,r}$ pie dažāda SC skaita

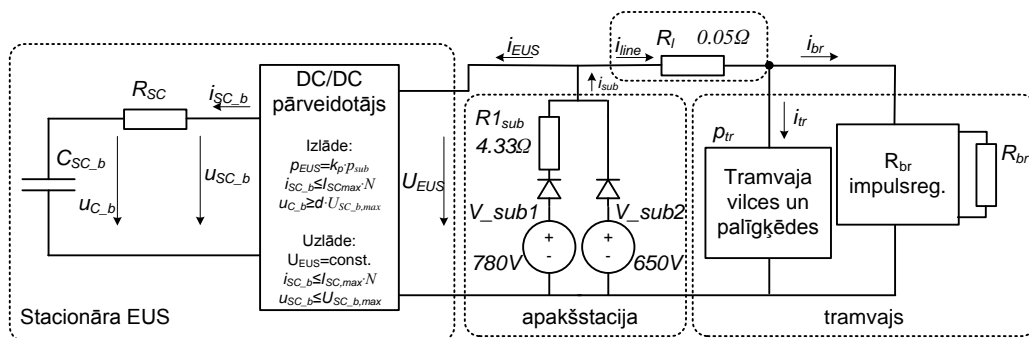
Lai novērtētu relatīvi vienkāršās konstanto parametru metodes efektivitāti, tā tiek salīdzināta ar mainīgo parametru metodi, un rezultāti redzami 4.8. att. EUS ar mainīgo parametru vadības metodi apskatītajā N diapazonā vidēji ļauj samazināt patēriņu no apakšstacija par 0,5 % vairāk nekā ar konstanto parametru vadības metodi.



4.8. att. EUS ($I_{SC,max} = 100$ A, $k_p = 0,3$) vadības metožu ietekme uz $E_{sub,r}$

4.2. Stacionāro enerģijas uzkrāšanas sistēmu vadības parametru izpēte

Lai veiktu EUS vadības parametru ietekmes uz atgūstamās enerģijas daudzumu novērtēšanu, ir jāveic sistēmas modelēšana plašā EUS vadības parametru diapazonā. Tas nozīmē, ka 2. nodaļā piedāvātais tramvaju sistēmas modelis šim nolūkam nav izmantojams, jo tā mazais aprēķinu laika solis noved pie ilgstošiem aprēķiniem. Tādēļ — līdzīgi kā mobilo uzkrājēju vadības parametru analizēšanas gadījumā — ir izveidots vienkāršots matemātiskais modelis tramvaju sistēmas matemātiskai modelēšanai. Vienkāršotā modeļa blokdiagramma redzama 4.9. att. Galvenie elementi šajā sistēmā ir stacionāra EUS, apakšstacija, kontaklīnijas pretestība un tramvajs.



4.9. att. Ar stacionāru EUS aprīkotas tramvaja sistēmas matemātiskā modeļa blokdiagramma

Šajā vienkāršotajā modelī ir tikai viens bloks, kas imitē tramvaja jaudas patēriņu, tāpēc tiek izmantota summārā tramvaju jaudas diagramma, kas sintezēta no eksperimentāli nomērītas tramvaja jaudas diagrammas.

Stacionārā EUS sastāv no divu kvadrantu impulsregulatora un SC baterijas. Lai arī SC baterijas sastāv no 800 SC (3400 F), tā tiek apskatīta kā viens elements, kam ir 800 SC summārā kapacitāte C_{SC_b} un summārā ekvivalentā virknes pretestība R_{SC_b} .

DC/DC pārveidotājs izpilda kontrolētas SC baterijas lādēšanas un izlādēšanas funkciju. Uzlādes laikā pārveidotājs nodrošina trīs darba režīmus:

- uzlāde1 — tiek nodrošināts konkrēts spriegums EUS ieejā ($U_{EUS} = \text{const}$);
- uzlāde2 — tramvaju ģenerētā jauda ir lielāka nekā EUS momentānā jaudas spēja. Tiek ierobežota SC baterijas strāva i_{SC_b} līmenī, kas atbilst vienas SC šūnas maksimāli pieļaujamai strāvai $I_{SC_max} = 100$ A.
- uzlāde3 — SC ir gandrīz uzlādēti un spriegums uz SC baterijas kapacitatīvās daļas (u_{C_b}) un ekvivalentās virknes pretestības R_{SC_b} ir sasniedzis maksimāli pieļaujamo vērtību $U_{SC_b,max}$. Tādēļ SC baterijas strāva tiek ierobežota, un tās vērtību nosaka ar vienādojumu:

$$i_{SC_b} = \frac{U_{SC_b,max} - u_{C_b}}{R_{SC_b}}. \quad (4.9.)$$

Izlādes laikā EUS var darboties divos režīmos:

- izlāde1 — EUS izlādējas ar jaudu, kas proporcionāla apakšstacijas jaudai:

$$P_{EUS} = k_p \cdot P_{sub}, \quad (4.10.)$$

kur k_p ir izlādes proporcionalitātes koeficients;

- izlāde2 — SC baterijas maksimālās strāvas ierobežošana.

EUS mainīgie parametri un modelēšanas rezultāti

SC izlādes līmenis d ir mainīgais, ar kuru var ietekmēt EUS gan uzlādes, gan izlādes režīmos. Izvēloties zemas d vērtības, tiek palielināta EUS enerģijas ietilpība (skat. vienādojumu (3.1.)), bet vienlaikus tiek samazināta EUS jaudas spēja (skat. vienādojumu (3.2.)), kas nozīmē, ka EUS darbosies uzlāde1 režīmā. Ja izvēlas pārāk augstas d vērtības, EUS ir ar pārāk mazu enerģijas ietilpību. Tā rezultātā SC baterija tiek uzlādēta, un EUS darbojas uzlāde3 režīmā, kas nozīmē, ka daļa enerģijas tiek izkliedēta bremžu rezistoros.

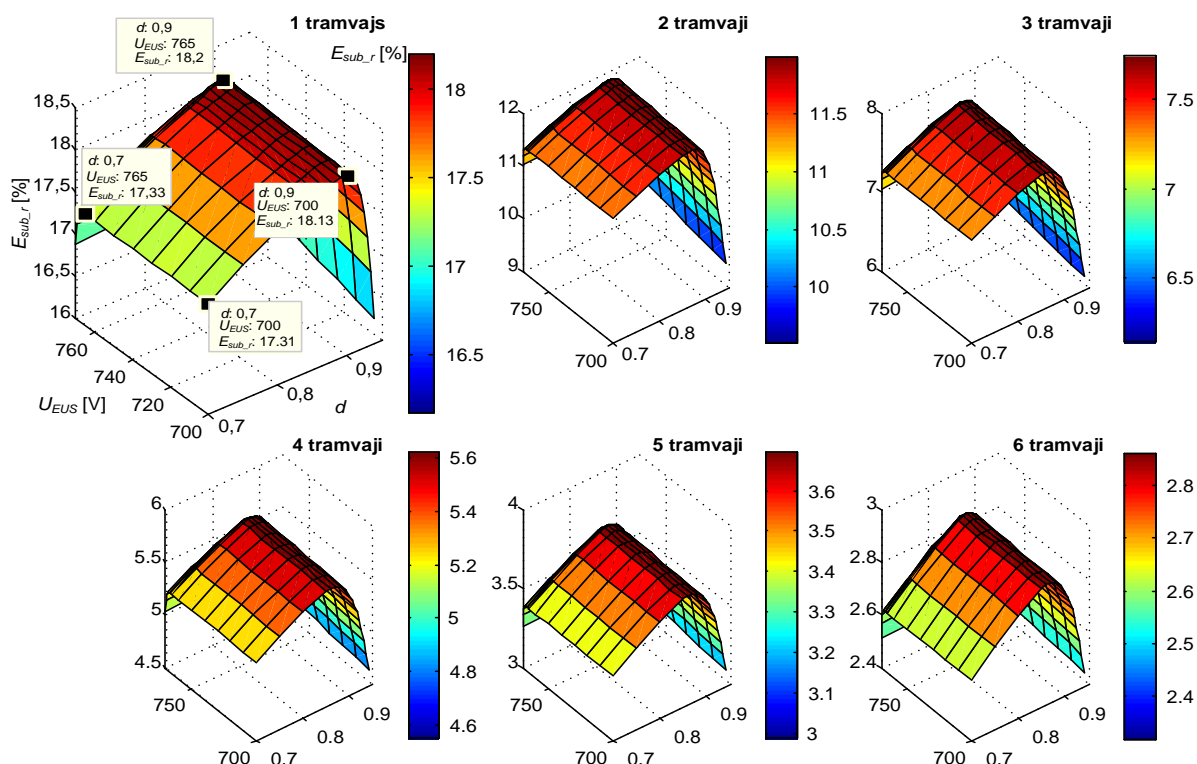
Otrs parametrs, kura ietekme uz atgūstamās enerģijas daudzumu tiks pārbaudīta, ir EUS ieejas spriegums U_{EUS} . Izvēloties augstākas vērtības U_{EUS} , tiek samazināts enerģijas daudzums, kas SC baterijā tiek ielādēts no apakšstacijas. Pie augstākām U_{EUS} vērtībām ir arī mazāki zudumi kontaktlīnijās, jo tiek paaugstināts spriegums, pa kādu tiek nodota enerģija no tramvaja uz EUS. Taču, izvēloties pārāk augstas U_{EUS} vērtības, bremzēšanas enerģijas nodošanu no tramvaja uz EUS var ierobežot pati kontaktlīnija. Maksimālo jaudu, ko pa kontaktlīniju no tramvaja var nodot EUS pie izvēlētās U_{EUS} vērtības, nosaka vienādojums:

$$P_{line_max} = \frac{(U_{br_max} - U_{EUS})U_{br_max}}{R_l}, \quad (4.11.)$$

kur: U_{br_max} — bremžu rezistoru impulsregulatora nostrādes spriegums (780 V).

Lai noskaidrotu, kā minētie EUS parametri ietekmē enerģijas patēriņu no apakšstacijas, tika veikta modelēšana ar dažādām U_{EUS} un d kombinācijām.

4.10. att. grafikā, kurā redzami modelēšanas rezultāti viena tramvaja gadījumam, izceltie datu punkti parāda, kā E_{sub_r} mainās, ja d tiek mainīts robežās no 0,7 līdz 0,9, bet U_{EUS} robežās 700–765 V. Redzams, ka U_{EUS} šajā diapazonā atstāj ļoti nelielu iespaidu uz enerģijas patēriņu no apakšstacijas. Tas nozīmē, ka no apakšstacijas uzkrātā enerģija enerģijas uzkrājējā ir maināma nebūtiski. Ja U_{EUS} palielina virs 765 V, E_{sub_r} sāk strauji samazināties. Tas notiek līnijas jaudas pārvades spējas dēļ, ko nosaka vienādojums (4.11.). Līdzīga U_{EUS} ietekme uz E_{sub_r} ir arī lielākam tramvaju skaitam. Veiktajos aprēķinos tika arī konstatēts, ka bremzēšanas laikā aptuveni 1,5 % no SC baterijā uzkrātās enerģijas nāca no apakšstacijas.

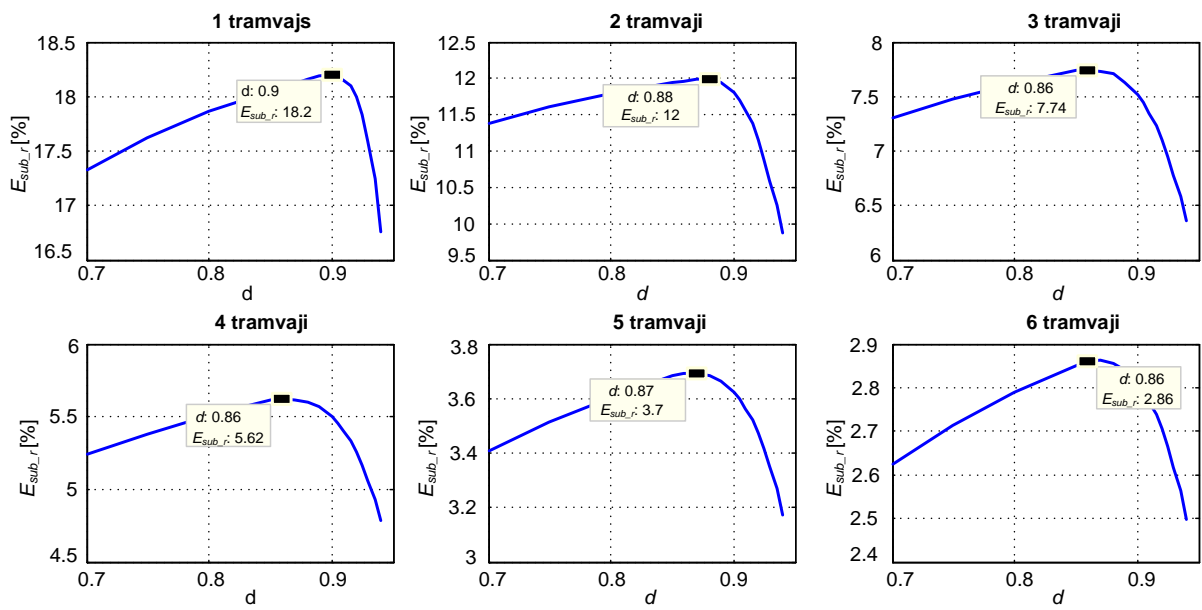


4.10. att. EUS vadības parametru ietekme uz enerģijas patēriņu no vilces apakšstacijas

4.10. att. uzskatāmi redzams, kā E_{sub_r} vērtība mainās atkarībā no tramvaju skaita. Viena tramvaja gadījumā apakšstacijas enerģijas patēriņš tiek samazināts par 18,2 %, savukārt sešu tramvaju gadījumā samazinājums ir tikai 2,86 %.

4.10. att. dod vispārēju pārskatu par d un U_{EUS} ietekmi uz E_{sub_r} . Detalizētākai d ietekmei uz enerģijas patēriņa samazinājumu no

4.10. att. grafikiem izceltas līknes, pie kurām $U_{EUS} = 765$ V (skat. 4.11. att.). No iegūtajām līknēm var secināt, ka SC baterijas izlādes līmenis var būt konstants lielums, kas atkarībā no tramvaju kursēšanas biežuma var būt 0,86 vai 0,87. Lai arī šādas d vērtības nav optimums gadījumam, kad apakšstacijas barošanas apgabalā ir tikai viens tramvajs, atšķirība starp U_{sub_r} vērtībām pie $d = 0,9$ un $d = 0,87$ ir pārāk maza, lai to ņemtu vērā.



4.11. att. SC izlādes līmeņa ietekme uz apakšstacijas enerģijas patēriņa samazinājumu

Secinājumi par darbu

Pētījumi par *SC* izmantošanu pilsētas elektriskā transporta bremsēšanas enerģijas atgūšanai ir aktuāli, jo tā ir jauna tehnoloģija un šādam lietojumam tiek pētīta nepilnus 15 gadus. Turklāt pasaulē ir tikai daži piemēri, kas demonstrē reālu EUS darbību pilsētas elektriskajā transportā.

Bremzēšanas enerģijas atgūšanai pamatā tiek izmantotas četras tehnoloģijas: reversīvās apakšstacijas, spararatu enerģijas uzkrājēji, *SC* enerģijas uzkrājēji, elektroķīmisko akumulatoru enerģijas uzkrājēji. Vismazāk komercializētas ir spararatu sistēmas, kas skaidrojams ar to komplikētību.

Darbā piedāvātā metode pilsētas elektriskā transporta barošanas kontakttīklu ekvivalentā modeļa iegūšanai ļauj būtiski vienkāršot kontakttīkla ekvivalento shēmu. Iegūto ekvivalento shēmu var izmantot sprieguma kritumu novērtēšanai dažādos kontakttīkla punktos.

Darbā piedāvātais *Matlab/Simulink* elektriskā transporta sistēmas modelis ļauj iegūt enerģijas patēriņa sadalījumu starp dažādiem pilsētas elektriskā transporta sistēmas elementiem. Ja ir pieejama jaudīga skaitļošanas tehnika, modelis var tikt izmantots modelēšanai, kurā tiek meklēti optimāli EUS parametri.

Enerģijas uzkrāšanas sistēmas spēka daļu, ko veido pazeminošais un paaugstinošais pārveidotājs un *SC* baterija, dažādos tās darbības režīmos var aprakstīt ar RLC ķēdes virknes slēguma analītiskajām izteiksmēm. *Matlab/Simulink* vidē izveidotais algoritms, kurā iekļautas šīs analītiskās izteiksmes, ļauj enerģijas uzkrāšanas sistēmu modelēt ar aprēķina laika soli, kas vienāds ar pārveidotāja darba frekvenci.

Izmantojot darbā piedāvāto EUS jaudas un enerģijas parametru izvēles metodi Rīgas 8. vilces akpašstacijai, var secināt, ka pilsētas elektriskā transporta sistēmās ar radiālu barošanas topoloģiju un līdzenu reljefu nepieciešamo *SC* skaitu galvenokārt nosaka *SC* jaudas spēja. Jaudas spēja arī nosaka, ka *SC* izlādes līmenis ir aptuveni 0,87. Turklāt, izvēloties *SC* skaitu tā, lai tie savā kalpošanas mūžā nestu maksimālo peļņu, netiek atgūta visa bremsēšanas enerģija.

Pilsētas elektriskā transporta sistēmās, kur barošanas apakšstacijām izmantota sešfāzu taisngrieža ar izlīdzinošo reaktoru shēma, aptuveni 1,5 % enerģijas stacionārā EUS tiek lādēta no apakšstacijas.

Izlādējot mobilo EUS ar proporcionālu jaudu apakšstacijas jaudai, jāizvēlas proporcionalitātes koeficients, kas ir ne mazāks par 0,3. Izlādējot EUS ar mazāku jaudu, *SC* baterija netiek izlādēta līdz līmenim, kas nodrošinātu pietiekamu enerģijas ietilpību nākamajai bremsēšanai.

Piedāvāto virknē slēgtu *SC* sprieguma mērīšanas risinājumu var izmantot pētniecības mērķiem, kur enerģijas uzkrājēji tiek testēti plašā sprieguma diapazonā.

Literatūra

- [1] European Commission, «Europe2020; A strategy for smart, sustainable and inclusive growth.» 2010.
- [2] Rīgas Dome, «RIGA SMART CITY SUSTAINABLE ENERGY ACTION PLAN FOR 2014 – 2020.» 2014.
- [3] L. Latkovskis, L. Grigans, U. Sirmelis, and J. Černovs, «Neizmantotās rekuperētās enerģijas aplēse Rīgas elektriskajā sabiedriskajā transportā,» *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 5, pp. 47–56, 2010.
- [4] R. L. Spyker and R. M. Nelms, «Optimization of double-layer capacitor arrays,» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 194–198, Jan. 2000.
- [5] D. MacCurdy, «Public Interest Energy Research (PIER) Program FINAL PROJECT REPORT.» 2010.
- [6] 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*, 2007, pp. 1–10.
- [7] A. Rufer, D. Hotellier, and P. Barrade, «A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks,» *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 629–636, Apr. 2004.
- [8] 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*, 2008, pp. 1–7.
- [9] R. Barrero, J. Van Mierlo, and X. Tackoen, «Energy savings in public transport,» *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 3, no. 3, pp. 26–36, Sep. 2008.
- [10] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, «Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles,» in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 1512–1517.
- [11] 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 *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08*, 2008, pp. 1–8.
- [12] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, «Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction in a Metro Network,» *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 224, no. 3, pp. 207–225, May 2010.
- [13] D. I. and D. Lauria, «A New Supercapacitor Design Methodology for Light Transportation Systems Saving,» Aug. 2011.
- [14] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and D. Lauria, «Supercapacitors-based energy storage for urban mass transit systems,» in *Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)*, 2011, pp. 1–10.
- [15] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and P. Tricoli, «Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand,» *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 24, no. 0, pp. 36–49, Oct. 2012.
- [16] D. Iannuzzi, F. Ciccarelli, and D. Lauria, «Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks,» *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 321–337, Apr. 2012.
- [17] S. D'Avanzo, D. Iannuzzi, F. Murolo, R. Rizzo, and P. Tricoli, «A sample application of supercapacitor storage systems for suburban transit,» in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2010*, 2010, pp. 1–7.
- [18] D. Iannuzzi, P. Pighetti, and P. Tricoli, «A study on stationary supercapacitor sets for voltage droops compensation of streetcar feeder lines,» in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2010*, 2010, pp. 1–8.

- [19] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, K. Kondo, and L. Fratelli, «Line Voltage Control based on Wayside Energy Storage Systems for Tramway Networks,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2015.
- [20] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and I. Spina, «Comparison of energy management control strategy based on wayside ESS for LRV application,» in *IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 1548–1554.
- [21] H. Hoimoja, D. Vinnikov, M. Lehtla, A. Rosin, and J. Zakis, «Survey of loss minimization methods in tram systems,» in *2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2010, pp. 1356–1361.
- [22] H. Hõimoja, «Energy Efficiency Estimation and Energy Storage Calculation Methods for Urban Electric Transportation,» Phd Thesis, Tallinn University of Technology, Tallin, Estonia, 2009.
- [23] L. Latkovskis and L. Grigans, «Estimation of the untapped regenerative braking energy in urban electric transportation network,» in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 2066–2070.
- [24] L. Grigans and L. Latkovskis, «Estimation of the power and energy requirements for trackside energy storage systems,» in *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009.
- [25] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, «Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy,» in *Proceedings of TRA2014*, France, p. 9.
- [26] T. Knotte, «Energy Storage Systems in the Catenary Grid of Light Rail and Trolleybus Systems,» Final report Trolley project, 2013.
- [27] O. Solis, K. Pham, and D. Turner, «SAVING MONEY EVERY DAY: LA METRO SUBWAY WAYSIDE ENERGY STORAGE SUBSTATION,» in *Proceedings of 2015 Joint Rail Conference*, ASV, Sanhose, 2015.
- [28] SAFT, «Railway Solutions- Regenerative Hybrid Traction.» / Internets – <http://www.saftbatteries.com/market-solutions/railways>.
- [29] Toshiba, /Internets – <http://www.infotechlead.com/networking/toshiba-supplies-traction-energy-storage-system-tobu-railway-27275>.
- [30] Hitachi, «Hitachi Review,» Vol. 59, No.4, 2010.
- [31] Kawasaki, «BATTERY POWER SYSTEM for railways.» / Internets – https://global.kawasaki.com/en/energy/solutions/battery_energy/applications/bps.html.
- [32] Siemens, «Siemens Installing First Regenerative Energy Storage Unit in the U.S. on New TriMet Light Rail Line.» / Internets – <http://news.usa.siemens.biz/press-release/smart-grid/siemens-installing-first-regenerative-energy-storage-unit-us-new-trimet-lig>.
- [33] Siemens, «Increasing energy efficiency; Optimized traction power supply in mass transit systems.» Produkta specifikācija/ Internets – https://w3.siemens.dk/home/dk/dk/mobility/baneelektrificering/Documents/increasing-energy-efficiency_brochure.pdf.
- [34] J. Poulin, «An Energy Storage System which reduces costs and generates revenue for the Transit Authority,» presented at the Annual Polis Conference, Spain, Madrid, 2014.
- [35] F. Devaux and X. Tackoen, «Overview of braking energy recovery technologies in the public transport field,» STIB, 2011.
- [36] Maxwell, / Internets – <http://investors.maxwell.com/phoenix.zhtml?c = 94560&p = irol-newsArticle&ID = 1903210>.
- [37] Meiden, «Annual Report,» 2008.
- [38] M. Meinert, K. Rechenberg, G. Hein, and A. Schmieder, «Energy Efficient Solutions for the Complete Railway System,» in *Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research*, Seoul, 2008, pp. P1–P11.
- [39] Alstom, «HESOP; All-in-one Energy & Cost saver.» Produkta specifikācija / Internets – <http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/HESOP%20-%20Product%20sheet%20-%20EN%20-%20LD.pdf?epslanguage = en-GB>.

- [40] Ingeteam, «Energy recovery systems for Bielefeld tram.» Produkta lietojuma apskats / Internets – http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Sector/Documento/SSE_1381_Archivo_bielefeld-e03.pdf.
- [41] Ingeteam, «Energy recovery systems for Bilbao.» Produkta lietojuma apskats / Internets – http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Sector/Documento/SSE_254_Archivo_sbp13-e01.pdf.
- [42] Ingeteam, «Energy recovery systems for Brussels metro.» Produkta lietojuma apskats / Internets – http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Sector/Documento/SSE_1918_Archivo_brussels-e04.pdf.
- [43] Ingeteam, «Energy recovery systems for Malaga C1 line.» Produkta lietojuma apskats / Internets – http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Sector/Documento/SSE_15_Archivo_adif-malaga-energy-recovery.pdf.
- [44] L. Grigans, «Rekuperētās elektriskās enerģijas izmantošana pilsētas elektrotransportā, pielietojot superkondensatorus,» Rīgas Tehniskā Universitāte, 2012.
- [45] P. Kreczanik, P. Venet, A. Hijazi, and G. Clerc, «Study of Supercapacitor Aging and Lifetime Estimation According to Voltage, Temperature, and RMS Current,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 9, pp. 4895–4902, Sep. 2014.
- [46] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, «Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles,» in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 1512–1517.
- [47] Y. Cheng and J. Van Mierlo, «Configuration and Verification of the Supercapacitor Based Energy Storage as Peak Unit in Hybrid Electric Vehicles,» in *EPE 2007 Conference Proceedings*, Aalborg, p. 2007.
- [48] R. Barrero, J. Van Mierlo, and X. Tackoen, «Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency,» *IEEE Veh. Technol. Mag.*, no. 1, pp. 26–36, 2008.