

Ģirts Staņa

ELEKTROTRANSPORTA LĪDZSTRĀVAS GAISVADU LĪNIJU MODELĒŠANA MOBILO ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU OPTIMIZĒŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Industriālās elektronikas, elektrotehnikas un enerģētikas institūts

Ģirts Staņa

Doktora studiju programmas "Elektrotehnoloģiju datorvadība" doktorants

ELEKTROTRANSPORTA LĪDZSTRĀVAS GAISVADU LĪNIJU MODELĒŠANA MOBILO ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU OPTIMIZĒŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
asociētais profesors *Dr. sc. ing.*
VIESTURS BRAŽIS
Konsultants
vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.*
KASPARS KROIČS

RTU Izdevniecība
Rīga 2024

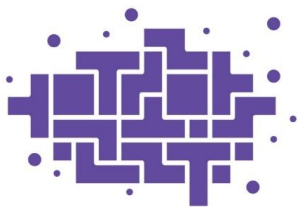
Staņa, Ģ. Elektrotransporta līdzstrāvas gaisvadu līniju modelēšana mobilo enerģijas uzkrājēju optimizēšanai. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 50 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-14” 2024. gada 14. februāra lēmumu, protokols Nr. 33400-4/1.

Promocijas darbs tapis ar Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras granta programmas atbalstu.

Promocijas darbs tapis ar projekta “4421 Krāsu atpakaļsaistīšanās ietekme uz virsotnes kvarka masas mērījumiem – pētījuma sagatavošana CERN LHP KMS eksperimenta 3. darba periodam”, lzp-2020/2-0228 atbalstu.

Promocijas darbs tapis ar projekta “4588 Ātras reakcijas laika un augstas efektivitātes uz GaN tranzistoriem bāzēta bezsuku līdzstrāvas motora pārveidotājs ar divkāršu barošanas avotu”, lzp-2021/1-0298 atbalstu.



FLPP
FUNDAMENTĀLO UN
LIETIŠĶO PĒTĪJUMU
PROJEKTI



Vāka attēls no www.shutterstock.com

<https://doi.org/10.7250/9789934370687>
ISBN 978-9934-37-068-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 19. jūnijā plkst. 10.00 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ilja Galkins,
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors *Dr. habil. sc. ing.* *Mikolaj Bartłomiejczyk*,
Gdaņskas Tehnoloģiju universitāte, Polija

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* *Pavel Drabek*,
Rietumbohēmijas Universitāte, Čehija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ģirts Staņa (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 151 attēls, deviņas tabulas, kopā 145 lappuses. Literatūras sarakstā ir 58 nosaukumi.

SATURS

| | |
|---|-----------|
| IEVADS | 4 |
| Darba mērķi un uzdevumi | 6 |
| Zinātniskās novitātes | 6 |
| Darba aprobācija | 7 |
| 1. SABIEDRISKĀ ELEKTRISKĀ TRANSPORTA MOBILU SUPERKONDENSATORU ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU SISTĒMU PROCESU MODELĒŠANA | 8 |
| 1.1. Zudumi rekuperētās enerģijas utilizēšanas procesā | 10 |
| 1.2. Superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas impulsu pārveidotāja darbības rezultātu modelēšanas metode | 11 |
| 2. JAUNAS PIEEJAS ELEKTRISKĀ TRANSPORTA KONTAKTTĪKLA ELEKTROPĀRVADES ZUDUMU APRĒĶINĀŠANĀ UN SIMULĒŠANĀ | 13 |
| 2.1. Kontakttīkla elektriskās pretestības aprēķināšana posmā starp apakšstaciju un transportlīdzekli tā kustības laikā | 14 |
| 2.2. Patērētāja sprieguma un strāvas aprēķins pie zināmiem pārvades līnijas parametriem un patērētāja jaudas | 15 |
| 2.3. Elektropārvades zudumu modelēšanas varianti | 18 |
| 2.4. Kontakttīkla elektriskās pretestības aprēķināšana un modelēšana divu trolejbusu kustības gadījumā | 20 |
| 2.5. Gaisvadu kontakttīkla temperatūras izmaiņas ietekme uz zudumiem un pilno apakšstacijas enerģijas patēriņu | 22 |
| 2.6. Līdzstrāvas līnijas parametru izmaiņu eksperimentāli mērījumi pie ilgstošām konstantām patērētāja jaudām | 25 |
| 3. EKONOMISKU MOBILU EUS MĒROGOŠANA REKUPERĒTĀS ENERĢIJAS EFEKTĪVAS IZMANTOŠANAS NODROŠINĀŠANAI | 27 |
| 3.1. Rekuperētās enerģijas utilizēšanas efektivitāte | 29 |
| 3.2. Mobilas superkondensatoru EUS optimālas izlādes vadības stratēģijas un to efektivitāšu salīdzinājums | 31 |
| 3.3. Mobilas superkondensatoru EUS masas ietekme uz transportlīdzekļa pilno enerģijas patēriņu | 34 |
| 3.4. Mobilas superkondensatoru EUS izmantošanas rezultātā ietaupīto finansiālo līdzekļu aprēķins | 35 |
| 4. SUPERKONDENSATORU KONSTANTAS JAUDAS UN KONSTANTAS STRĀVAS UZLĀDES/IZLĀDES METOŽU EFEKTIVITĀŠU SALĪDZINĀJUMS | 39 |
| 4.1. SC ķēdes konstantas strāvas un konstantas jaudas uzlādes/izlādes efektivitāšu savstarpējs salīdzinājums | 43 |
| 4.2. SC ķēdes eksperimentāla uzlādēšana/izlādēšana un mērījumu salīdzināšana ar simulāciju rezultātiem | 46 |
| 5. SECINĀJUMI | 48 |
| 6. LITERATŪRAS SARAKSTS | 49 |

IEVADS

Jebkuras attīstītas valsts galvaspilsētai un pārējām lielpilsētām sabiedriskā elektriskā transporta infrastruktūra, būdama neatņemama sastāvdaļa, ir viens no lielākajiem elektriskās enerģijas patērētājiem, tāpēc jautājumi par sabiedriskā elektriskā transporta infrastruktūras energoefektivitātes uzlabošanu, kas balstās elektriskās enerģijas patēriņa samazināšanā, ir aktuāli. Veicot pētījumus par sabiedrisko elektrisko transportlīdzekļu, piemēram, trolejbusu energoefektivitātes uzlabošanu, ne vienmēr ir iespējams izmantot reālus transportlīdzekļus – tie var nebūt pieejami vai arī to izmantošana var būt nesamērīgi dārga. Tāpēc virtuālu datormodeļu izmantošana var būt kā alternatīva arī pirms eksperimenta veikšanas ar reāliem transportlīdzekļiem [1], [2]. Par enerģijas uzkrājēju sistēmas (EUS) lietošanu sabiedriskajos elektriskajos transportlīdzekļos līdz šim ir veikti gan pētījumi ar praktiskiem eksperimentiem ar reāliem transportlīdzekļiem [3],[4],[5], gan pētījumi ar elektrisko transportlīdzekļu un EUS datormodeļiem [6], [7]. Elektriskā transporta un tā EUS darbības modelēšanu var veikt dažādās virtuālās vidēs, piemēram, *PSIM* [8], [9] un *Matlab Simulink* [10], [11]. Tomēr līdz šim veiktajos teorētiskajos pētījumos par EUS lietošanu elektriskajam transportam var atrast vairākus trūkumus un vājās vietas, kas aplūkotas šajā darbā. Piemēram, nav veikti pētījumi par to, cik enerģijas elektriskais transportlīdzeklis spiests patērēt uz papildu superkondensatoru (SC) EUS masas rēķina un vai šī enerģijas patēriņa starpība ir izteikti būtiska uz atgūstamās un atkārtoti izmantojamās rekuperētās enerģijas fona.

No attāluma starp apakšstaciju un transportlīdzekli atkarīgā mainīgā elektropārvades pretestība bieži tikusi pieņemta kā konstanta jeb nemainīga visā kustības cikla laikā [12], [13]. Ir izstrādāti arī modeļi, kuros elektropārvades pretestība mainās ik pa sekcijām [14]. Tāpēc, lai veikto simulāciju rezultāti pēc iespējas precīzāk atbilstu reālām situācijām, promocijas darba gaitā tika izstrādāti modeļi, kuros kontakttīkla elektropārvades pretestība reālā laikā mainās dinamiski ik pa noteiktam attālumam, kādu trolejbuss veic. Lai arī parasti pētījumos apakšstaciju iekšējie zudumi ir tikuši ņemti vērā, lietojot rezistoru elementus, kas imitē noteiktu pretestību jeb zudumus apakšstacijas transformatorā un taisngriezī, tomēr nereti nav tikuši ņemti vērā iekšējie zudumi piedziņas invertoros un EUS impulsu pārveidotājos.

Atsevišķos pētījumos, izmantojot reālus eksperimentāli iegūtus datus par elektriskā transporta patērēto un reģenerēto jaudu, ir prezentētas metodes, kā veikt elektriskā transporta neizmantojotās reģenerētās enerģijas aplēses aprēķinus ar varbūtisku un statistisku metožu palīdzību [15], [16]. Reģenerētās enerģijas atgūšanas efektivitāte ir atkarīga no EUS pieļaujamās jaudas un energoietilpības. Līdz ar to iespējams veikt ekonomijas aprēķinus, kas ietver atmaksas periodu konkrētai EUS un kopējos enerģijas ietaupījumus darbmūža laikā. Taču autori atzinuši, ka precīzākiem atgūstamās enerģijas aprēķiniem būtu jāņem vērā arī zudumi kontakttīkla vados un EUS [17].

Ja nav pieejas jeb iespējas izmantot reālus sabiedrisko elektriskos transportlīdzekļus pētniecības darbā, kura izstrādes gaitā elektrisko transportlīdzekli aprīko ar reālu EUS, nereti tiek izmantoti arī stacionāri vilces piedziņas standi, kas parasti sastāv no divām savstarpēji sajūgtām elektriskajām mašīnām, no kurām viena imitē transportlīdzekļa vilci, otra – slodzi [18], [19]. Tomēr parasti šādiem stadiem jaudu mērogi ir krietni mazāki par reālu

transportlīdzekļu jaudām, tāpēc eksperimentu rezultātus, kas veikti uz stendiem, nevar uzskatīt par pilnīgi precīziem, pat ja tiek ievērota proporcionalitāte.

Līdz šim nav veikti pētījumi par to, kā mainās EUS efektivitāte tās kalpošanas laikā, kas izpaužas ar elektrisko parametru pasliktināšanos. Visefektīvāk *SC* iekārta strādā tad, kad tā ir jauna un tikko uzstādīta, bet saskaņā ar ražotāju sniegto informāciju par iekārtas novecošanos ar katru nākamo uzlādes/izlādes ciklu tās elektriskie parametri arvien vairāk degradējas. Iekārtas darbmuža laikā šī novecošanās var būtiski ietekmēt reģenerētās bremsēšanas enerģijas akumulēšanas efektivitāti, jo kādā brīdī EUS energoietilpība var būt samazinājusies līdz tādai pakāpei, ka EUS vairs nespēj uzņemt visu elektriskā transportlīdzekļa rekuperēto enerģiju. Tāpēc šajā promocijas darbā izklāstīts, ka objektīvāku ilgtermiņa EUS rentabilitātes un atmaksas aprēķinu rezultātu iegūšanai ir jāņem vērā arī *SC* novecošanās ietekme.

Mobilas EUS atsevišķos gadījumos var uzlādēt arī no kontakttīkla, un galvenās uzlādes metodes ir uzlāde ar konstantu strāvu un uzlāde ar konstantu padoto jaudu. Ir veikti teorētiski pētījumi par *SC* slēguma uzlādi/izlādi ar konstantu jaudu, balstoties *RC* (rezistora-kondensatora virknes slēguma) modelī [20]. Taču līdz šim ne teorētiski, ne praktiski efektivitātes ziņā nav salīdzināta *SC* uzlāde/izlāde ar konstantu strāvu un *SC* uzlāde/izlāde ar konstantu padoto jaudu pie vienādiem robežnosacījumiem, proti, abos gadījumos gan uzlāde, gan izlāde notiek no vienādiem sākotnējiem spriegumiem līdz vienādiem beigu spriegumiem vienādos laikos, tāpēc to tika nolemts veikt šī darba gaitā, balstoties visplašāk izmantotajā reāla *SC* aizvietošanas modelī – *RC* ķēdē.

Darba mērķi un uzdevumi

1. Izstrādāt uzlabotas pārvades zudumu modelēšanas metodes pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta sabiedriskā elektriskā transporta – trolejbusa – kustības simulācijām.
2. Izstrādāt metodi, kā noteikt apjomu, par kādu ekonomiskas mobilas *SC* EUS pieejamajai energoietilpībai jābūt augstākai par maksimālo rekuperēto enerģiju, ņemot vērā to, ka *SC* elementu energoietilpība ekspluatācijas laikā samazinās.
3. Ar simulāciju palīdzību izpētīt, kā mobilas *SC* EUS masa ietekmē jeb palielina trolejbusa piedziņas enerģijas patēriņu un vai šis pieaugums ir nozīmīgs uz izmantotās rekuperētās enerģijas fona.
4. Izstrādāt metodi, kā tuvināti aprēķināt *SC* EUS darbmuža laikā ietaupīto apakšstacijas enerģijas apjomu un tā finansiālo vērtību, ko var salīdzināt ar *SC* EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksām, lai analizētu *SC* EUS atdevi.
5. Salīdzināt mobilu *SC* EUS izlādes stratēģijas, kuru mērķis ir panākt, lai kopā ar apakšstaciju EUS spētu apgādāt piedziņu ar jaudu līdz paātrināšanās beigām, novēršot apakšstacijas jaudas pīķi, kas var rasties, ja EUS izlādējas pirms paātrināšanās beigām.

Promocijas darba hipotēzes

1. Mobilas *SC* EUS papildu masas dēļ izraisītais trolejbusa piedziņas enerģijas patēriņa pieaugums ir zem 5 %.
2. *SC* slēguma ekvivalentas aizvietošanas *RC* (rezistors-kondensators) ķēdē uzlāde ar konstantu strāvu ir tikpat efektīva, kā uzlāde ar konstantu padoto jaudu, ja abos

gadījumos uzlāde notiek vienādos laika ilgumos un vienādos sprieguma diapazonos, savukārt izlāde ar konstantu strāvu ir tikpat efektīva, kā izlāde ar konstantu izlādēto jaudu izejā, ja abos gadījumos izlāde notiek vienādos laika ilgumos un vienādos sprieguma diapazonos.

Zinātniskās novitātes

1. Izstrādāta metode, kā reāllaikā aprēķināt patērētāja spriegumu, strāvu un sprieguma kritumu pie zināmas patērētāja jaudas, pārvades pretestības un avota sprieguma, izveidojot atbilstošu vienādojumu sistēmu, no kuras iegūst kvadrātvienādojumus un pēc loģiskiem apsvērumiem noskaidro to pareizās atrisinājumu saknes. Pēc līdzīga principa izstrādāta arī metode, kā aprēķināt pārvades sprieguma krituma kompensēšanas strāvu, kuras uzdevums ir panākt, lai patērētājam tiktu nodrošināta nepieciešamā jauda.
2. Izstrādāti trīs gaisvadu kontakttīkla pārvades pretestības reāllaika imitēšanas algoritmi: ar elektrisko parametru matemātisku aprēķinu; ar virtuālu rezistoru elementu izmantošanu; ar virtuālu sprieguma avota elementu izmantošanu.
3. Izstrādāta metode, kā reāllaikā modelēt mobilas SC EUS impulsu pārveidotāja darbības rezultātus bez pārveidotāja iekšējo procesu un komutāciju modelēšanas.
4. Rekomendēta metode, kā noteikt apjomu, par kādu mobilas SC EUS sākotnējai energoietilpībai jābūt lielākai par maksimālās rekuperētās enerģijas apjomu, lai visā EUS ekspluatācijas laikā rekuperētā enerģija tiktu efektīvi uzkrāta un izmantota, rēķinoties ar EUS novecošanos un zudumiem impulsu pārveidotājā un invertorā.
5. Ar simulāciju palīdzību pētīts, kā mobilas EUS papildu masas ietekmē pieaug trolejbusa piedziņas enerģijas patēriņš, noskaidrojot, ka šis pieaugums nepārsniedz 5 % un ir maznozīmīgs, salīdzinot ar veiksmīgi uzkrāto un izmantoto rekuperēto enerģiju.
6. Izstrādātas un salīdzinātas mobilo EUS izlādes vadības stratēģijas, kuru mērķis ir panākt, lai EUS ar tās pieejamo enerģijas apjomu spētu apgādāt trolejbusa piedziņu ar enerģiju līdz paātrināšanās režīma beigām, tādējādi novēršot apakšstacijas jaudas pīķi.
7. Izstrādāta metode, kā tuvināti aprēķināt ietaupītās apakšstacijas enerģijas apjomu un tā pilno cenu visa EUS darbmūža laikā, un noskaidrots, ka izteiktāka EUS atdeve vērojama nevis pie zemākām EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksām, bet pie augstākām elektroenerģijas cenām.
8. Uz RC ķēdes bāzes, salīdzinot SC uzlādi/izlādi ar konstantu strāvu un uzlādi/izlādi ar konstantu jaudu pie vienādiem uzlādes/izlādes nosacījumiem, ar aprēķiniem un simulācijām atklāts, ka uzlāde/izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi/izlādi ar konstantu jaudu, taču šī atšķirība parasti ir mazāka par 1 %.

Darba aprobācija

Promocijas darbā atspoguļotie rezultāti izklāstīti 32 publicētos darbos, tajā skaitā trīs – zinātnisko žurnālu rakstos (no kuriem divi indeksēti *SCOPUS*), viens – kolektīvā monogrāfijā un 28 – konferenču publikācijās (no kurām 23 indeksētas *SCOPUS*), kas tika prezentētas 26 zinātniskās konferencēs šādās valstīs: Latvijā (9), Igaunijā (5), Krievijā (4), Rumānijā (3), Čehijā (2), Turcijā (1), Bulgārijā (1), Lietuvā (1).

1. SABIEDRISKĀ ELEKTRISKĀ TRANSPORTA MOBILO SUPERKONDENSATORU ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU SISTĒMU PROCESU MODELĒŠANA

Modernas sabiedriskā elektriskā transporta vienības (tai skaitā trolejbusi) ir aprīkotas ar rekuperējošu elektrisko piedziņu, un, pateicoties tai, bremsēšanas režīma laikā trolejbusa vilces piedziņa darbojas elektriskās enerģijas ģeneratora režīmā, ģenerējama papildu elektrisko enerģiju, kas tiek saukta arī par reģenerēto vai rekuperēto enerģiju. Trolejbusos ir ierīkoti bremsēšanas rezistori, kur rekuperētā enerģija tiek izkliedēta siltumā, ja to nekur citur izmantot nevar. Trolejbusi kursēšanas laikā, it īpaši intensīvas satiksmes apstākļos, bremsēšanu veic samērā bieži, tāpēc tiek ģenerēts diezgan nozīmīgs rekuperētās enerģijas apjoms un ir vērts meklēt iespējas, kā šo rekuperēto enerģiju izmantot lietderīgi, un galvenā no šādām iespējām ir EUS izmantošana.

Rīgā vilces apakšstacijās nereversīvie taisngrieži nodrošina tikai vienvirziena elektriskās enerģijas plūsmu, tāpēc rekuperēto enerģiju nevar novadīt no apakšstacijas uz augstsprieguma tīklu. Rekuperēto enerģiju gan var novadīt uz citu trolejbusu, kas pārvietojas tajā pašā kontakttīkla posmā, tomēr bieži negadās tādas situācijas, kad, vienam trolejbusam bremsējot, otrs tajā pašā kontakttīkla posmā esošs trolejbuss uzņem ātrumu. Turklāt trolejbuss, kas uzņem ātrumu, var arī neabsorbēt visu bremsējošā trolejbusa rekuperēto jaudu, jo attiecīgā momentā pieprasītās jaudas apjoms var būt mazāks par rekuperēto. Tāpēc var uzskatīt, ka EUS nepieejamības gadījumā lielākā daļa no rekuperētās enerģijas izkliedējas bremžu rezistoros.

Rekuperētās enerģijas uzkrāšanai un atkārtotai izmantošanai var izmantot divu veidu EUS – mobilās, kas ir ierīkotas pašā transportlīdzeklī (par mobilām tās sauc tāpēc, ka, būdamas ierīkotas transportlīdzeklī, tās visu laiku pārvietojas līdz ar pašu transportlīdzekli), un stacionāras, kas ierīkotas apakšstacijā vai ārpus apakšstacijas pieslēgtas pie kontakttīkla (par stacionārām tās sauc tāpēc, ka, būdamas ierīkotas apakšstacijā vai pieslēgtas pie kontakttīkla, tās nepārvietojas, bet atrodas konkrētā vietā).

Mobilas EUS izmantošanas gadījumā nav aktuāli elektropārvades zudumi, taču to galvenais trūkums ir papildu noslodze trolejbusam, jo uz mobilas EUS rēķina trolejbusam ir lielāka masa. Līdz ar to trolejbusa kustības laikā tā vilces piedziņa patērē vairāk enerģijas, salīdzinot ar situāciju bez šīs papildu noslodzes. Tomēr, no otras puses, darbā tika izpētīts un apstiprināts, ka šis trūkums tiek nokompensēts ar uzviju saistībā ar faktu, ka kustības laikā, izmantojot šajā mobilajā EUS pieejamās enerģijas apjomu, kas tika uzkrāts iepriekš bremsēšanas režīma laikā, būtiski samazinās kopējais apakšstacijas enerģijas patēriņš, salīdzinot ar situāciju, ja visa rekuperētā enerģija tiktu izkliedēta bremžu rezistoros. Taču nefunkcionējošas mobilas EUS gadījumā trolejbusa kustības laikā pilnais apakšstacijas enerģijas patēriņš viennozīmīgi ir augstāks saistībā ar augstāku piedziņas enerģijas patēriņu un attiecīgi arī augstākiem elektropārvades zudumiem.

Stacionāru EUS izmantošanas gadījumā trolejbusam netiek radīta papildu noslodze, taču elektropārvades zudumi ir aktuāli. No stacionārās EUS ņemtās enerģijas apjomi un arī uz stacionāro EUS novadītās enerģijas apjomi, kas zaudēti elektropārvadē, ir mainīgi atkarībā no attāluma starp trolejbusu un stacionāro EUS.

EUS izmantošanas pamata priekšrocības ir:

- zemāks jaudas patēriņš no apakšstacijas un zemāka kontakttīkla noslodze;
- zemāki zudumi elektropārvadē;
- zemāks apakšstacijas pilnais enerģijas patēriņš.

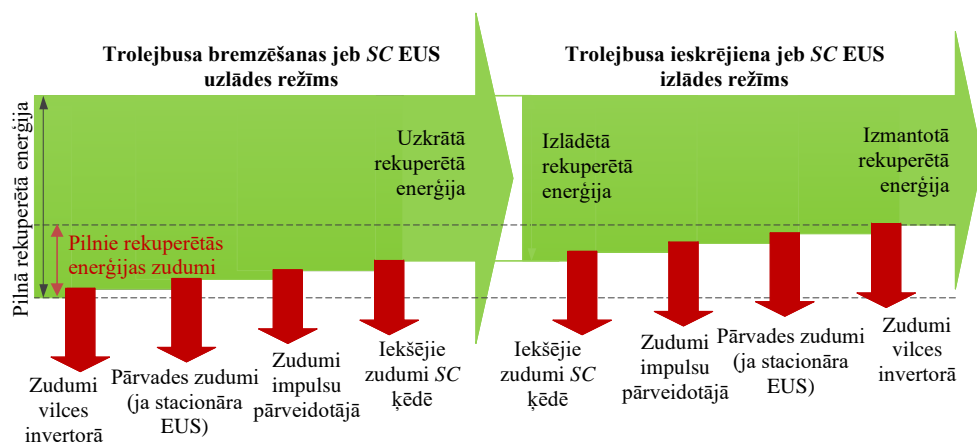
2004. gada avotā [21], kas ir viens no pirmajiem, kurā tiek aplūkota iespēja EUS izmantot elektriskajā transportā, ir piedāvāts priekšlikums elektriskā transporta gaisvadu kontakttīklam pieslēgt stacionāras SC balstītās EUS, kas nosauktas pat par SC apakšstacijām, ar mērķi samazināt kontakttīkla sprieguma kritumu attiecībā pret transportlīdzekli, kas pārvietojas. Vietas, kur šīs stacionāru SC apakšstacijas pieslēdzamas pie kontakttīkla, piemēram, kontakttīkla sekcijas galapunktos, definētas kā vājie jeb sensitīvie punkti, kas atrodas vistālāk no apakšstacijas, jo tajos attiecīgi ir augstāki elektropārvades zudumi, un minēts, ka tajos spriegums no 700 V vērtības, kad slodžu nav, mēdz nokristies līdz pat 350 V pie straujiem jaudas pieprasījumiem, kad vairākas elektriskā transporta vienības vienlaikus uzsāk paātrināšanos. (Rīgā esošo apakšstaciju spriegums ir 600 V, līdz ar to arī jebkuras kontakttīkla sekcijas spriegums, kad slodžu nav, ir 600 V). Modernas maiņstrāvas vilces piedziņas sistēmas nav paredzētas izteiktām ieejas sprieguma svārstībām, tāpēc stacionāru EUS lietošana ir aplūkota kā pragmatisks risinājums. Avotā minēts, ka reģeneratīvas bremsēšanas iespēja ir tipiska attiecīgā laika jauno transportlīdzekļu, piemēram, trolejbusu, tramvaju un metro, iespēja. Taču lielākā daļa apakšstaciju ir nereversīvas, kas nozīmē, ka reģenerētā enerģija nav padodama atpakaļ uz augstsprieguma tīklu. Līdz ar to nākas izmantot rezistorus, kuros rekuperētā enerģija tiek izkliedēta siltumā, tomēr nav pieminēts, ka pastāv iespēja reģenerēto enerģiju novadīt uz kādu citu transportlīdzekli, kas atrodas tajā pašā kontakttīkla posmā un kas paātrinās. Pirmās EUS ierīkotas Londonas metro, izmantojot rotējošas kinētiskās enerģijas tehnoloģijas [22], [23]. Pirmās SC balstītās EUS ierīkotas Ķelnē, Vācijā [24], [25].

Avotā [25] veikti simulācijās balstīti pētījumi par EUS izmantošanas efektivitāti, konstatējot, ka, pateicoties mobilām EUS, apakšstacijas kopējais enerģijas patēriņš vidēji ir par 24–27,6 % mazāks, savukārt EUS SC darbmūža beigu posmā – par 18,1–25,1 % mazāks atkarībā no lietotajiem SC moduļiem. Tāpēc ir ieteikts izvēlēties EUS, kas ir ar tādu energoietilpību, kas vienāda ar reģenerētās enerģijas apjomu. Pieminēts un parādīts, kā pašā pēdējā EUS darbmūža posmā ir pasliktinājušies tās elektriskie parametri un samazinājusies tās energoietilpība, tāpēc daļa no reģenerētās enerģijas tiek izkliedēta bremsu rezistoros. Arī [12] ir parādīta EUS efektivitāte pašā tās darbmūža beigu punktā, t. i., miljonajā uzlādes/izlādes ciklā, bet – nav tikusi analizēta efektivitāte visa EUS darbmūža laikā, piemēram, pēc pirmajiem 30 000, 50 000, 200 000 cikliem utt., un nav ieteikts ierosinājums, ka EUS vajadzētu izvēlēties ar tādu energoietilpību, kas ir par zināmu procentu augstāka nekā reģenerētā enerģija, ar mērķi, lai visā SC iekārtu kalpošanas laikā to energoietilpība būtu pietiekama, lai nebūtu nepieciešamības daļu rekuperētās enerģijas izkliedēt bremsēšanas rezistoros. Tāpēc šī darba trešajā nodaļā aprakstīta EUS plānošanas un aprēķina metode, kuras mērķis ir noskaidrot nepieciešamo EUS ietilpību un attiecīgo SC šūnu skaitu tā, lai EUS ekspluatācijas laikā tās energoietilpība nesamazinātos līdz tādām apjomam, kurā nepietiek vietas visas rekuperētās enerģijas uzkrāšanai.

Avotā [7] analizēta arī EUS impulsu pārveidotāja lietderības koeficienta ietekme uz ietaupītās enerģijas apjomu, taču nav analizēta piedziņas invertora efektivitātes ietekme uz ietaupītās enerģijas apjomu. Tāpat, kā caur impulsu pārveidotāju, arī caur vilces invertoru reģenerētā enerģija viena pilna EUS uzlādes/izlādes cikla laikā iziet cauri divas reizes. Līdz ar to ir saprotama pamatotība tam, ka precīzākiem pētījumiem par ietaupīto enerģiju būtu ieteicams ņemt vērā arī invertora darbības efektivitātes ietekmi uz ietaupītās enerģijas apjomu. Tāpēc šī darba trešajā nodaļā aprakstīta gan EUS impulsu pārveidotāja, gan vilces invertora lietderības koeficientu ietekme uz reģenerētās enerģijas izmantošanas efektivitāti.

1.1. Zudumi rekuperētās enerģijas utilizēšanas procesā

1.1. attēlā redzama trolejbusa rekuperētās enerģijas utilizēšanas jeb dzīves cikla diagramma, lai detalizēti izskaidrotu, kā turpmākajā pētniecības darbā tika ņemti vērā visi iespējamie rekuperētās enerģijas zudumi, kuriem ir noteikta secība. EUS uzlādes procesā rekuperētā enerģija izplūst caur vilces invertoru un impulsu pārveidotāju, savukārt izlādes procesā veiksmīgi uzkrātā enerģija caur tām pašām iekārtām plūst atpakaļ uz vilces piedziņu. Tādējādi var secināt, ka piedziņas invertora un EUS impulsu pārveidotāja lietderības koeficienti var atstāt ievērojamu ietekmi uz rekuperētās enerģijas utilizēšanas efektivitāti, it īpaši tāpēc, ka pilna EUS uzlādes/izlādes cikla laikā enerģija caur katru iekārtu plūst cauri divas reizes.



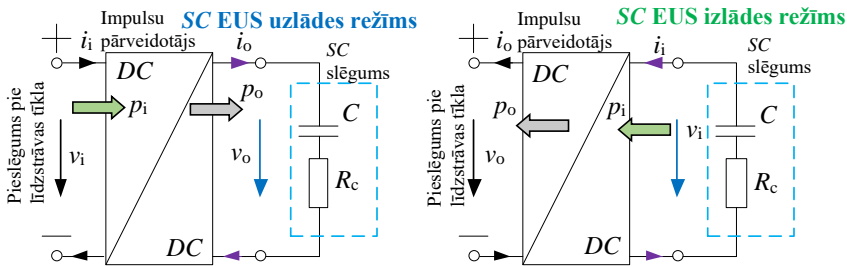
1.1. att. Rekuperētās enerģijas utilizēšanas jeb dzīves cikla shēma.

Elektriskajam transportlīdzeklim līdzās vilces piedziņai ir arī dažāds papildu aprīkojums, kas patērē enerģiju, piemēram, apgaismojums, durvju atvēršana/aizvēršana utt., taču kopumā šīs iekārtas patērē maznozīmīgu enerģijas daudzumu, salīdzinot ar piedziņas patērēto enerģijas daudzumu. Toties ievērojamu enerģijas apjomu var patērēt gaisa kondicionēšanas sistēmas vasaras sezonā un apkures sistēmas ziemas sezonā. Turklāt tieši bremzēšanas laikā zināma daļa rekuperētās enerģijas tiek automātiski izmantota iepriekš minēto pašpatēriņa aprīkojumu darbināšanai. Promocijas darbā tika pieņemts, ka transportlīdzekļi tā pārvietošanās laikā nefunkcionē ne gaisa kondicionēšanas sistēmas, ne apkures sistēmas.

1.2. Superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas impulsu pārveidotāja darbības rezultātu modelēšanas metode

Līdzsprieguma impulsu pārveidotāji mēdz būt dažādi to uzbūves sarežģītības un sniegto iespēju ziņā, taču darbības pamatprincipi visiem pārveidotājiem būtībā ir līdzīgi. 1.2. attēlā redzamajās vienkāršotajās shēmās pārveidotājs ir sadalīts divās daļās, no kurām viena ir pieslēgta pie līdzsprieguma tīkla (kreisā pusē), otra – pie SC slēguma (labā pusē).

Turpmāk darbā SC slēgums ir jāsaprot kā vairāku SC šūnu slēgums, kas ekvivalenti aizvietots ar kondensatora un rezistora virknes slēgumu, kas bieži tiek saukts par RC slēgumu. Tostarp kondensatora C kapacitāte atbilst visu SC šūnu kopējai kapacitātei, savukārt rezistora R_c pretestība – kopējai aktīvajai pretestībai. Minētie parametri tiek aprēķināti pēc attiecīgajām formulām atkarībā no tā, kā SC šūnas saslēgtas – virknē vai paralēli.



1.2. att. Strāvu un jaudu plūsmas attiecībā pret impulsu pārveidotāju.

Parasti par pārveidotāja ieeju uzskata to daļu, kurā jauda ieplūst, par izeju – daļu, no kuras jauda izplūst. Līdz ar to EUS uzlādes režīmā pie tīkla pieslēgtā pārveidotāja daļa ir ieeja, pie SC slēguma pieslēgtā daļa – izeja. Savukārt izlādes režīmā pie SC slēguma pieslēgtā pārveidotāja daļa ir ieeja, pie tīkla puses pieslēgtā daļa – izeja.

Ideāla līdzsprieguma impulsu pārveidotāja pamata būtība ir tāda, ka tā ieejošā jauda p_i ir vienāda ar izejošo jaudu p_o . Tas nozīmē, ka šādā bezzudumu situācijā ieejas puses strāvas i_i un sprieguma v_i reizinājums ir vienāds ar izejas puses strāvas i_o un sprieguma v_o reizinājumu –

$$i_i v_i = i_o v_o. \quad (1.1.)$$

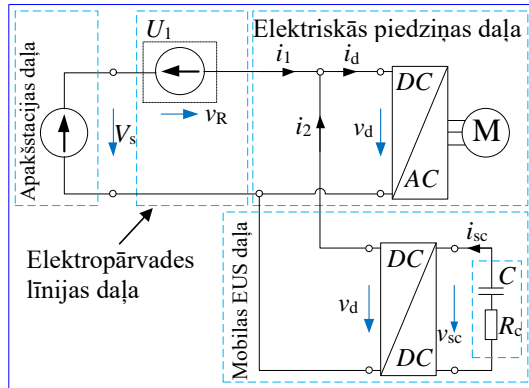
Tomēr reālā situācijā pārveidotājam ir arī iekšējie zudumi, par kuru apjomu var spriest pēc tā lietderības koeficienta jeb efektivitātes η . Tas nozīmē, ka iekšējo zudumu dēļ izejas jauda p_o vienmēr ir zemāka par ieejas jaudu p_i , ko var raksturot ar sakarību

$$p_o = \eta p_i. \quad (1.2.)$$

Tāpēc 1.1. izteiksmi ir jāpārveido, iekļaujot pārveidotāja efektivitāti η , tādējādi iegūstot faktisko attiecību starp pārveidotāja ieejas un izejas strāvām un spriegumiem –

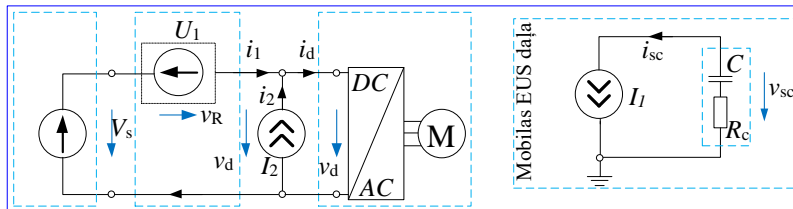
$$i_o v_o = \eta i_i v_i. \quad (1.3.)$$

1.3. attēlā redzama pie kontakttīkla pieslēgta un ar mobilu EUS aprīkota trolejbusa modeļa shēma. U_1 ir sprieguma avots līnijas sprieguma krituma simulēšanai.



1.3. att. Ar mobīlu SC EUS aprīkota trolejbusa modeļa vienkāršota blokhēma.

Lai nebūtu jāsimulē impulsu pārveidotāja komutācijas procesi, tika izstrādāts tāds trolejbusa kustības virtuāls modelis, kur EUS izlāde un uzlāde tiek simulēta ar strāvas avotu palīdzību, izmantojot divas nesavienotas blokhēmas, kā redzams 1.4. attēlā, ar mobīlas SC EUS izlādi. Shēma kreisajā pusē imitē tīkla pusi attiecībā pret impulsu pārveidotāju, savukārt shēma labajā pusē – SC pusi attiecībā pret impulsu pārveidotāju. Tas nozīmē, ka pats pārveidotājs simulēts netiek, bet tiek simulēti tā darbības rezultāti. Uzlādes procesa laikā abiem 1.4. attēlā redzamajiem strāvas avotiem ir pretēji strāvas plūsmas virzieni atšķirībā no parādītajiem.



1.4. att. Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta un ar mobīlu SC EUS aprīkota trolejbusa modeļa ar divām nesavienotām blokhēmām vienkāršota shēma, kur parādīta EUS izlāde.

Ir vērts piebilst, ka piedziņas daļu, kas iekļauj invertoru un motoru M, var vienkāršot, aizvietojojot to ar strāvas avotu (1.4. att.). Tomēr šajā gadījumā ir jābūt iepriekš zināmam un sagatavotam trolejbusa jaudas profilam, kas tiek iestatīts jaudas līknes veidā atkarībā no laika. Izmantojot zināmo piedziņas jaudu, reāllaikā tiek aprēķināta attiecīgā piedziņas strāva, kas tiek iestatīta trolejbusa piedziņu imitējošajam strāvas avotam, kā piedziņas jaudas un piedziņas sprieguma dalījums.

SC EUS uzlādes gadījumā (1.4. att.) esošajiem strāvas avotiem ir pretēji plūšanas virzieni, salīdzinot ar parādītajiem, savukārt līdz impulsu pārveidotājam nonākusi jauda p_i ir zemāka par pilno rekuperēto jaudu p_d invertora zudumu dēļ, tāpēc p_i tiek aprēķināta pēc 1.4. formulas.

$$p_i = \eta_{inv} p_d, \quad (1.4.)$$

kur η_{inv} – invertora lietderības koeficients.

Līdz ar to strāvas avotam I_2 iestatāmā strāva tiek aprēķināta pēc 1.5. formulas.

$$i_2 = \frac{p_i}{v_d}. \quad (1.5.)$$

Impulsu pārveidotājam cauri izgājusī jauda jeb impulsu pārveidotāja SC puses jauda p_{sc} ir zemāka par ieejas jaudu p_i pārveidotāja zudumu dēļ, tāpēc p_{sc} tiek aprēķināta pēc 1.6. formulas

$$p_{sc} = \eta_{imp} p_i, \quad (1.6.)$$

kur η_{imp} – impulsu pārveidotāja lietderības koeficients.

Strāva impulsu pārveidotāja SC pusē, kas iestatāma strāvas avotam I_1 , tiek aprēķināta pēc 1.7. formulas.

$$i_{sc} = \frac{p_{sc}}{v_{sc}}, \quad (1.7.)$$

kur v_{sc} – ir SC slēguma pilnais spriegums, kas simulācijas laikā tiek mērīts.

Modelī ir jābūt arī algoritmam, kas simulācijas laikā kontrolē SC EUS uzlādes stāvokli. Tiklīdz SC EUS uzlādējas līdz maksimāli pieļaujamajam sprieguma līmenim, tā strāvas avotiem I_1 un I_2 strāvu iestatīšana ir jāpārtrauc. Tas nozīmē SC EUS uzlādes apturēšanu, un līdz ar to jauda, kas vēl turpina rekuperēties, izkliedējas siltumā. Attiecīgais algoritms ņem vērā spriegumu uz kondensatora C elementa, uz kura ir faktiskais SC slēguma uzlādes stāvokļa spriegums. Iekšējās pretestības R_{sc} dēļ uzlādes gadījumā ar voltmetru nomērītais SC slēguma spriegums ir nedaudz augstāks par faktisko, savukārt izlādes gadījumā – zemāks.

SC EUS izlādes gadījumā var definēt nosacījumu, kas nosaka pilnās piedziņas jaudas daļas apjomu, kas tiek ņemts no apakšstacijas, un apjomu, kas tiek ņemts no SC EUS. Šādā gadījumā strāvas avotam I_2 iestatāmo strāvu aprēķina pēc 1.8. formulas.

$$i_2 = \frac{k p_d}{v_d} = \frac{p_2}{v_d}, \quad (1.8.)$$

kur k – koeficients, kas nosaka, kādu daļu no piedziņas jaudas p_d veido no SC EUS ņemtā jauda p_2 .

Jauda impulsu pārveidotāja SC pusē tiek aprēķināta, rēķinoties ar zudumiem impulsu pārveidotājā un invertorā, pēc 1.9. formulas.

$$p_{sc} = \frac{p_2}{\eta_{inv} \eta_{imp}}. \quad (1.9.)$$

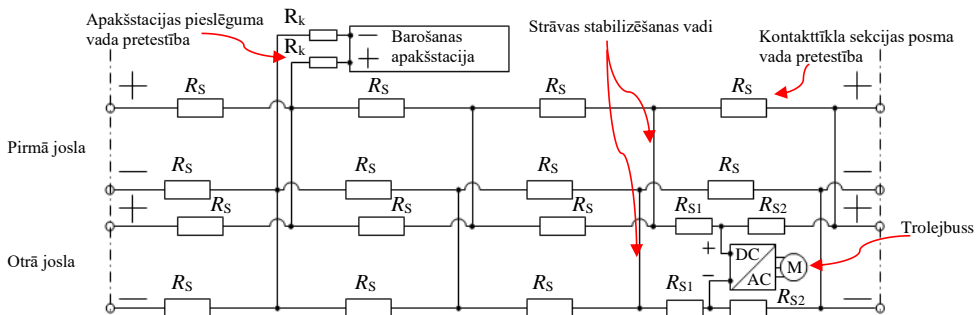
Strāvas avotam I_1 iestatāmās strāvas aprēķina formula ir vienāda ar 1.7. formulu. Turklāt modelī jābūt arī algoritmam, kas kontrolē SC EUS izlādes stāvokli. Tiklīdz SC EUS izlādējas līdz minimāli pieļaujamajam sprieguma līmenim, tā strāvas avotiem I_1 un I_2 strāvu iestatīšana ir jāpārtrauc. Tas nozīmē SC EUS izlādes apturēšanu, pēc kuras visa piedziņai nepieciešamā jauda tiek ņemta no apakšstacijas.

2. JAUNAS PIEEJAS ELEKTRISKĀ TRANSPORTA LĪDZSTRĀVAS KONTAKTTĪKLU ELEKTROPĀRVADES ZUDUMU APRĒĶINĀŠANĀ UN SIMULĒŠANĀ

Veicot aprēķinos un simulācijās balstītus pētījumus par elektriskā transportlīdzekļa, kas piesaistīts gaisvadu kontakttīklam, piemēram, trolejbusa, energoefektivitāti, ir jāreķinās ar zudumiem gaisvadu kontakttīklā. Trolejbusam pārvietojoties, tā atrašanās vieta kontakttīkla posmā nepārtraukti mainās, līdz ar to kontakttīkla elektropārvides pretestība posmā starp barošanas apakšstaciju un trolejbusu ir mainīgs lielums.

2.1. Kontakttīkla elektriskās pretestības aprēķināšana posmā starp apakšstaciju un transportlīdzekli tā kustības laikā

Trolejbusam jābūt pieslēgtam pie divu kontaktvadu pāra, t. i., pozitīvās (+) un negatīvās (-) polaritātes, lai tiktu nodrošināta jaudas plūsma no apakšstacijas uz trolejbusa piedziņu. Ielās, pa kurām pārvietojas trolejbusi, galvenokārt ir divvirzienu satiksme, līdz ar to katrai no joslām ir savs (+) un (-) polaritātes kontaktvadu pāris. Pārsvarā vienmēr tiek izmantota iespēja ar strāvas stabilizēšanas vadiem saslēgt paralēli minēto divu joslu kontaktvadu pārus, tādējādi samazinot pārvides pretestību. Aprakstītā situācija ar gaisvadu kontakttīkla posmu, kur abu joslu (+) un (-) polaritātes vadi saslēgti paralēli, redzama 2.1. attēlā. Rezistori R_s simbolizē attiecīgu sekciju vadu pretestības. Trolejbusa piedziņa shēmā apzīmēta ar invertoru un maiņstrāvas dzinēju. Turpmāk promocijas darbā pieņemts, ka kontakttīkla posms sastāv no 200 m garām sekcijām un katras sekcijas 200 m garā vada pretestība $R_s = 0,0354 \Omega$, pieņemot, ka izmantotie kabeļi ir MF-100 ar 100 mm^2 šķērsriezuma laukumu un īpatnējo pretestību $\rho = 1,77 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.



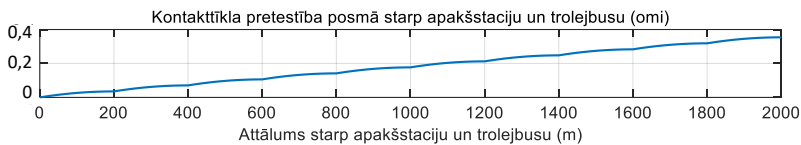
2.1. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskā shēma.

2.1. attēlā redzamo rezistoru slēgumu var vienkāršot līdz pat vienam rezistoram R , kas simbolizē pilno kontakttīkla pārvides pretestību R gaisvadu posmam starp apakšstaciju un trolejbusu, kā redzams 2.3. attēlā, kur trolejbusa piedziņa aizvietota ar strāvas avotu D , savukārt apakšstaciju imitē sprieguma avots S . Pretestībai R atbilstošā izteiksme ir šāda:

$$R = 2R_k + aR_s + R_s \left(\frac{x}{d} \right) \left(2 - \frac{x}{d} \right) = 2R_k + R_s \left(a + \left(\frac{x}{d} \right) \left(2 - \frac{x}{d} \right) \right), \quad (2.1.)$$

kur a – koeficients, kas apzīmē sekciju skaitu pirms trolejbusa atrašanās vietas sekcijas;
 x – trolejbusa atrašanās vietas koordināte sekcijā (no 0 m līdz 200 m), m;
 $d = 200$ m – kontakttīkla posma sekcijas, kurā atrodas trolejbus, garums;
 R_k – apakšstacijas pieslēguma kabeļa pretestība.

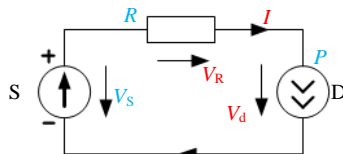
2.2. attēlā redzams, kā pretestība saskaņā ar 2.1. izteiksmi pieaug pa atsevišķām sekcijām. Šajā gadījumā nav ņemta vērā R_k , pieņemot, ka trolejbus atrodas ļoti tuvu apakšstacijai.



2.2. att. Gaisvadu kontakttīkla pretestība posmā starp apakšstaciju un trolejbusu.

2.2. Patērētāja sprieguma un strāvas aprēķins pie zināmiem pārvades līnijas parametriem un patērētāja jaudas

Situāciju ar vienu elektriskās enerģijas patērētāju var attēlot 2.3. attēlā redzamās elektriskās ķēdes veidā, kur strāvas avots D ir patērētājs, rezistors R – pārvades pretestība, S – sprieguma avots. Turpmāk pieņemts, ka patērētājs ir trolejbus, kas konkrētā momentā patērē jaudu $P = 200$ kW, sprieguma avots ir apakšstacija ar spriegumu $V_S = 600$ V, pārvades pretestība $R = 0,2$ Ω. Zināmie parametri 2.3. att. un 2.2. vienādojumā attēloti zaļā krāsā, nezināmie – sarkanā.



2.3. att. Elektriskā ķēde ar sprieguma avotu, patērētāju un pārvades pretestību.

Matemātisks aprēķins ar kvadrātvienādojumu izvešanu

2.3. attēlā redzamo situāciju var noformulēt uzdevuma veidā ar šādiem nosacījumiem:

dots: $P = 200$ kW; $V_S = 600$ V; $R = 0,2$ Ω;

jāaprēķina: $I = ?$; $V_d = ?$; $V_R = ?$.

Lai arī 2.3. attēlā redzamā ķēde ir elementāra, tomēr šī uzdevuma atrisināšana vairs nav tik vienkārša, jo ietver vairākus soļus un prasa zināmu atjautību. Vispirms jāuzraksta trīs vienādojumu sistēma, kurā balstās dotās ķēdes darbība saskaņā ar Oma un otro Kirhofa likumu.

$$\begin{cases} P = IV_d \\ V_R = IR \\ V_S = V_R + V_d \end{cases} \quad (2.2.)$$

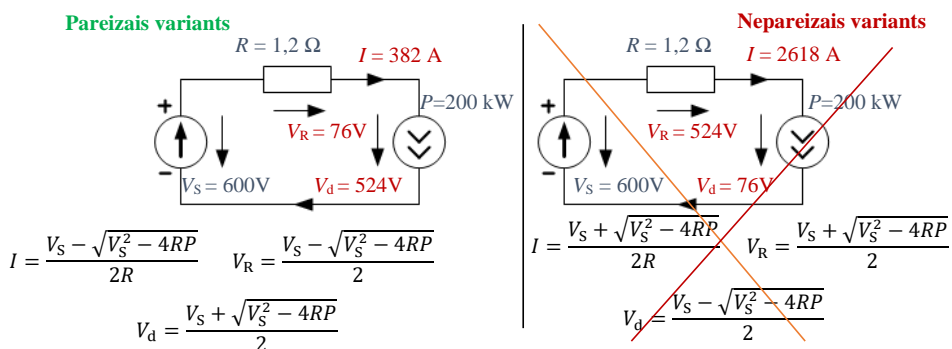
Tā kā 2.2. vienādojumu sistēma ietver trīs vienādojumus un trīs nezināmos, tad matemātiski tai ir atrisinājums, taču risināšanas gaitā tiek izvesti kvadrātvienādojumi. No 2.2. sistēmas var izvest 2.3. kvadrātvienādojumu strāvas I aprēķinam, 2.4. kvadrātvienādojumu sprieguma krituma V_R aprēķinam un 2.5. kvadrātvienādojumu patērētāja sprieguma V_d aprēķinam.

$$RI^2 - V_S I + P = 0, \quad (2.3.)$$

$$V_R^2 - V_S V_R + RP = 0, \quad (2.4.)$$

$$V_d^2 - V_S V_d + RP = 0. \quad (2.5.)$$

Kvadrātvienādojumu dēļ katram no parametriem $-I$, V_R un V_d – pastāv divas aprēķināšanas formulas, tāpēc rodas jautājums, kura formula ir pareizā, jo, piemēram, strāvai I nevar būt vienlaikus divas dažādas vērtības. Ja vienādojumu sistēmai ir vairāki atrisinājumi, tad no matemātikas viedokļa pastāv vairāki varianti, pie kuriem attiecīgā sistēma ir spējā. Kā par piemēru 2.4. attēlā parādīti divi elektriskās ķēdes varianti, pie kuriem ir spējā aplūkotā 2.2. sistēma. Zem katras ķēdes ir uzrakstītas atbilstošās kvadrātvienādojumu atrisinājumu saknes, savukārt aprēķinātās skaitliskās vērtības ir norādītas pie attiecīgajiem parametriem ķēdēs.



2.4. att. Divi elektrisko ķēžu varianti, pie kuriem ir spējā 2.2. vienādojumu sistēma.

2.4. attēlā var redzēt, ka “nepareizajā” variantā V_R un V_d , salīdzinot ar “pareizo” variantu, ir samainīti vietām, tāpēc arī strāva I iznāk tik augsta. Lai arī uzdevuma risināšanas gaita balstās elementārajā matemātikā, tomēr rezultātā iegūtie vairāki risinājuma varianti var radīt zināmu apmulsumu. Tas nozīmē, ka pareizās atrisinājumu saknes jāizsecina pēc loģiskiem apsvērumiem, piemēram, ka V_R vērtība nevar būt augstāka par V_d , tāpēc 2.4. vienādojuma pareizā sakne ir ar $(-)$ zīmi pirms kvadrātsaknes, un 2.5. vienādojumā – ar $(+)$ zīmi. Savukārt 2618 A strāva ir pārāk augsta trolejbusa piedziņas strāvai, tāpēc 2.3. vienādojuma pareizā sakne ir ar $(-)$ zīmi pirms kvadrātsaknes. Tomēr kādu no iepriekš pieminētajiem apgalvojumiem ir ieteicams pievienot kā piebildi attiecīgā uzdevuma nosacījuma aprakstā, ja šādu uzdevumu nolēmj uzdot atrisināt studentiem ar elektrotehnikas nozari saistītos mācību priekšmetos. Izvestos kvadrātvienādojumus un to sakņu formulas nevar saukt par vispārzināmām fizikas vai elektrisko ķēžu aprēķinu formulām, taču bez to izvešanas nevar rakstiski izrēķināt konkrēto uzdevumu. Faktiski pilnīgi pietiek izvest tikai viena parametra – I , V_R vai V_d –

kvadrātvienādojumu un atrisināt tā pareizās saknes vērtību, jo atlikušos parametrus var aprēķināt ar attiecīgajām formulām, kā parādīts 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Elektriskās ķēdes parametru aprēķins

| | Parametrs, kas tiek aprēķināts ar kvadrātvienādojuma sakni | | Atlikušie parametri, kas tiek aprēķināti ar vispārīgām formulām |
|-------------|--|---------------|---|
| 1. variants | $I = \frac{V_S - \sqrt{V_S^2 - 4RP}}{2R}$ | \Rightarrow | $V_R = IR; \quad V_d = V_S - V_R$ |
| 2. variants | $V_R = \frac{V_S - \sqrt{V_S^2 - 4RP}}{2}$ | \Rightarrow | $I = \frac{V_R}{R}; \quad V_d = V_S - V_R$ |
| 3. variants | $V_d = \frac{V_S + \sqrt{V_S^2 - 4RP}}{2}$ | \Rightarrow | $V_R = V_S - V_d; \quad I = \frac{V_R}{R}$ |

Variants ar kvadrātvienādojumu izvešanu, aprēķinot zudumu kompensēšanas strāvu

Metode ir līdzīga iepriekš aprakstītajai, taču sniedz papildu ieskatu pārvades zudumu kompensēšanā ar stiprāku strāvu. Var pieņemt, ka 2.2. vienādojumu sistēmā strāva I ietver divas komponentes – ideālā bezzudumu režīma strāvu I_{id} un papildu strāvu I_c , ar kuru tiek kompensēts sprieguma kritums V_R , tādējādi nodrošinot nepieciešamo jaudu P . Neatkarīgi no trolejbusa atrašanās vietas nepieciešamā piedziņas jauda P konkrēta kustības ātruma nodrošināšanai saglabāsies viena un tā pati. Ja gaisvadu kontakttīkls būtu bez pretestības, tad piedziņas spriegums V_d būtu vienāds ar apakšstacijas spriegumu V_S . Līdz ar to var uzrakstīt šādu divu vienādojumu sistēmu I_c un V_R aprēķinam:

$$\begin{cases} P = I_{id}V_S = IV_d = (I_{id} + I_c)(V_S - V_R) \\ V_R = (I_{id} + I_c)R \end{cases} \quad (2.6.)$$

No 2.6. vienādojumu sistēmas var izvest 2.7. kvadrātvienādojumu I_c aprēķinam un iegūt pareizo sakni (2.8. vienādojums), kā arī 2.9. kvadrātvienādojumu V_R aprēķinam un iegūt pareizo sakni (2.10. vienādojums).

$$I_c^2 R + I_c(2I_{id}R - V_S) + I_{id}^2 R = 0, \quad (2.7.)$$

$$I_c = \frac{-2I_{id}R + V_S - \sqrt{V_S(V_S - 4I_{id}R)}}{2R}, \quad (2.8.)$$

$$V_R^2 - V_S V_R + I_{id} V_S R = 0, \quad (2.9.)$$

$$V_R = \frac{V_S - \sqrt{V_S(V_S - 4I_{id}R)}}{2}. \quad (2.10.)$$

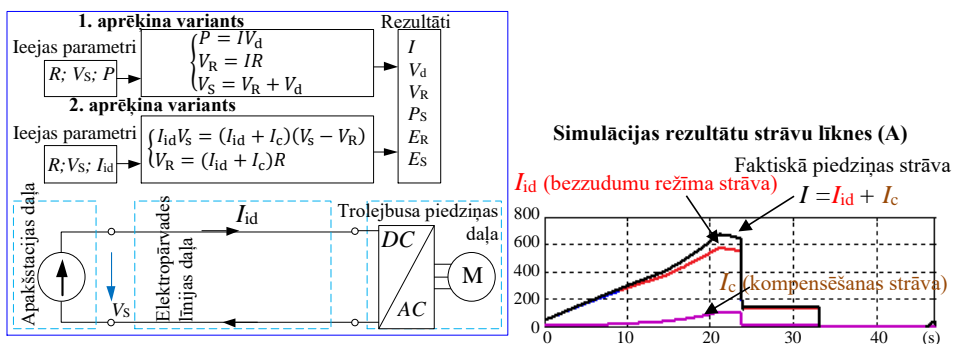
2.9. un 2.10. izteiksmei un arī iepriekšējām izteiksmēm (2.4. att.) atrisinājumi ir tad, ja to zemsakņu jeb diskriminantu izteiksmes ir lielākas vai vienādas ar nulli. Gadījums ar diskriminantu, vienādu ar nulli, ir pie maksimālās pretestības R situācijā, kad spriegumi V_R un V_d katrs ir vienādi ar pusi no apakšstacijas sprieguma V_S . Tomēr trolejbusa situācijā minimālais V_d spriegums, līdz kādam tas var nokristies, ir 400 V, tātad augstāk par pusi no $V_S = 600$ V.

2.3. Elektropārvades zudumu modelēšanas varianti

Tālāk aprakstīti trīs veidi, kā modelēt pārvades zudumus trolejbusa kustības simulācijas laikā, un pārvades pretestība R simulācijas laikā pastāvīgi tiek aprēķināta ar 2.1. formulu.

Pārvades zudumu modelēšana ar elektrisko parametru matemātisku aprēķinu

2.5. attēlā redzamais modelis ietver ķēdi bez pārvades pretestību imitējoša rezistora. Modeļa blokshēma visu laiku strādā ideālā bezzudumu režīmā, kur plūstošā strāva ir I_{id} un piedziņas spriegums V_d ir vienāds ar apakšstacijas spriegumu V_s . Taču modeļa darbības laikā ar atsevišķu aprēķinu bloku tiek aprēķināta faktiskā strāva I , sprieguma kritums V_R un piedziņas spriegums V_d , zudumu jauda P_R , apakšstacijas jauda P_s , pārvadē zaudētā enerģija E_R un pilnā apakšstacijas enerģija E_s . Ir divi varianti, kā aprēķināt nezināmos I , V_R un V_d : reāllaikā mērīt piedziņas jaudu P , to aprēķiniem izmantojot 2.2. vienādojumu sistēmu; reāllaikā mērīt ideālā režīma strāvu I_{id} , to aprēķiniem izmantojot 2.6. vienādojumu sistēmu. 2.5. attēlā parādīti abu aprēķinu variantu bloki ar attiecīgiem ieejas parametriem. Var izvēlēties, kuru aprēķina variantu lietot, bet rezultāti ir vienādi. Pirmais variants ir vieglāks apjoma ziņā, savukārt otrais variants ļauj apskatīt, par cik piedziņas strāva ir jāpalielina esošo pārvades zudumu dēļ. Piemērs dots 2.5. attēlā – labā pusē parādīti ar pasažieriem piepildīta $27Tr$ kustības simulācijas strāvu rezultāti gan bezzudumu režīmā (I_{id}), gan zudumu režīmā (I), pieņemot, ka trolejbuss sākumā atradās 0,6 km no apakšstacijas un paātrinājās līdz 50 km/h.

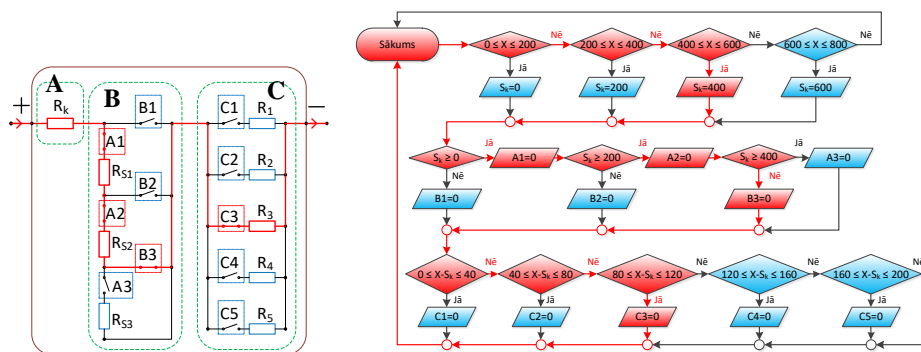


2.5. att. Trolejbusa kustības modelis ar parametru aprēķināšanu un strāvu līknes.

Pārvades zudumu modelēšana ar rezistoru ķēdi saturošu apakšsistēmu

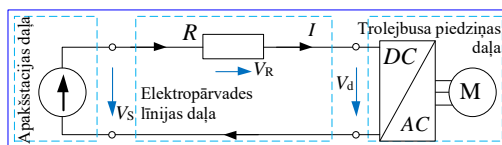
2.6. attēla kreisajā pusē parādīta shēma trolejbusa kontakttīkla pārvades zudumu simulēšanas apakšsistēmai ar rezistoru ķēdi, labajā pusē – šīs apakšsistēmas darbības algoritms ar nosacījumiem, pie kādiem attiecīgiem slēdžiem jābūt noslēgtiem. Ar sarkanu krāsu atzīmēts strāvas plūsmas ceļš, par piemēru ņemot situāciju, kad trolejbuss atrodas 80–120 m attālumā no apakšstacijas, savukārt algoritmiskajā shēmā ar sarkanu krāsu iekrāsots dotās situācijas cikls. Pārvades pretestību R imitējošo rezistoru ķēdi saskaņā ar trolejbusa atrašanās koordināti X kontrolē slēdži, reāllaikā saslēdzot atbilstošu rezistoru ķēdi. A bloks ietver apakšstacijas pievades kabeļu pretestības imitēšanas rezistoru, B – rezistorus, kas atbilst kontakttīkla sekciju elektropārvades pretestībām R_s , un C – rezistorus, kas atbilst vienas kontakttīkla sekcijas

atsevišķu daļu pārvides pretestībām. Ja sekcijas garums ir 200 m, tad 2.6. attēlā redzamā blokhēma atbilst variantam, kur pārvides pretestība tiek izmainīta ik pa 40 m, ko trolejbuss veic kustības laikā, jo C daļā ir pieci rezistori. C daļā rezistoru skaitu var palielināt, piemēram, līdz diviem simtiem, ja tiek nolemts veikt vēl precīzākas simulācijas, izmainot R ik pa vienam metram, taču tad modelis kļūst komplicētāks ar ilgāku kompilēšanas laiku.



2.6. att. Rezistoru apakšsistēmas elektriskā shēma un tās regulēšanas algoritmiskā blokhēma.

2.7. attēlā redzama vienkāršota trolejbusa kustības modeļa, kas ietver apakšsistēmu R ar pārvides pretestību imitējošo rezistoru ķēdi (2.6. att.), blokhēma.



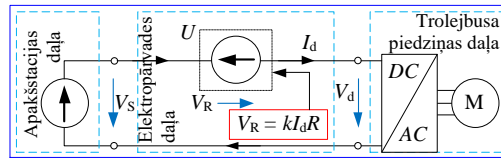
2.7. att. Trolejbusa kustības modeļa ar rezistoru apakšsistēmu vienkāršota blokhēma.

Pārvides zudumu modelēšana ar sprieguma avota izmantošanu

Pasīvo elementu – rezistoru – ir iespējams ekvivalenti aizvietot ar aktīvo elementu – sprieguma avotu. Šajā metodē rezistoru apakšsistēmas vietā ir sprieguma avots U , kā redzams 2.8. attēlā, kuram reāllaikā tiek iestatīta kontakttīkla sprieguma kritumam V_R atbilstošā vērtība. Simulācijas laikā ar strāvas mērinstrumentu tiek mērīta strāva I , tās reizinājums ar pretestību R ir atbilstošs V_R vērtībai, kāda tiek iestatīta sprieguma avotam. Gluži kā modelī ar rezistoru apakšsistēmu, arī šajā modelī sprieguma kritums V_R tiek kompensēts automātiski ar stiprāku strāvu no apakšstaciju imitējošā sprieguma avota. Modelis darbojas atbilstoši reālai situācijai, jo atšķirībā no modeļa ar rezistoru apakšsistēmu, kur pretestība mainās ik pa noteiktiem soļiem, šajā gadījumā pretestība mainās visu laiku atkarībā no trolejbusa veiktā attāluma. Konkrētajam modelim pie V_R aprēķina ir iespējams ņemt vērā arī trolejbusa piedziņas invertora zudumu kompensēšanu. Arī zudumi invertorā tiek kompensēti, ņemot stiprāku strāvu no apakšstacijas, tādējādi nodrošinot prasīto piedziņas jaudu invertora izejā. Ja invertora lietderības koeficients ir k , tad sprieguma avotam iestatāmā V_R aprēķināšanas formula ir šāda:

$$V_R = kI_d R. \quad (2.11.)$$

Būtiska priekšrocība šim modelim ir tāda, ka tas ir ievērojami vienkāršāks par iepriekš aprakstītajiem un neietver sarežģītus aprēķināšanas un ķēžu regulēšanas algoritmus. Tāpēc turpmāk aprakstītā divu trolejbusu kustības modeļa simulācijas tika veikta uz šī modeļa bāzes.

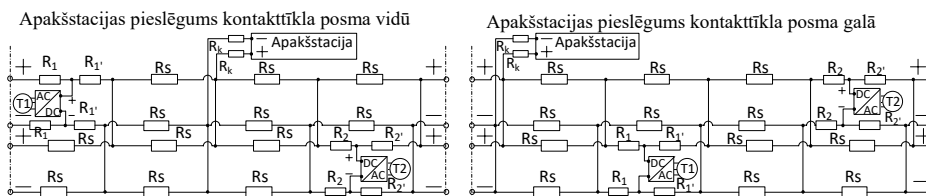


2.8. att. Trolejbusa kustības modeļa ar sprieguma avotu vienkāršota blokshēma.

2.4. Kontakttīkla elektriskās pretestības aprēķināšana un modelēšana divu trolejbusu kustības gadījumā

Trolejbusa bremsēšanas režīmā rekuperēto jaudu var novadīt uz kādu citu trolejbusu, kas atrodas tajā pašā posmā un attiecīgajā momentā uzņem ātrumu. Faktiski EUS neesamības gadījumā bremsējoša trolejbusa rekuperētā jauda automātiski tiek novadīta uz kontakttīklu virzienā, kur atrodas trolejbuss, kas uzņem ātrumu. Pētot šādu rekuperētās jaudas izmantošanas variantu, ir jāreķinās ar gaisvadu pārvades pretestību, jo starp abiem trolejbusiem ir arī savstarpējais attālums. Līdz ar to noteikta daļa rekuperētās jaudas tiks zaudēta pārvades vadu pretestības dēļ, turklāt pie lielāka trolejbusu savstarpējā attāluma būs lielāki zudumi.

Divu trolejbusu kustības gadījumā apakšstacija var būt pieslēgta kontakttīklam starp abiem trolejbusiem, kā redzams 2.9. attēla kreisajā pusē, vai kādā no kontakttīkla posma galapunktiem, kā redzams 2.9. attēla labajā pusē. Var secināt, ka pirmajā situācijā trolejbusu strāvu sadalījums katram trolejbusam, kad abi uzņem ātrumu, ir tāds pats kā iepriekš viena trolejbusa kustības gadījumā, neskatot R_k posmu, savukārt otrajā situācijā posmā starp apakšstaciju un tai tuvāko trolejbusu T_1 plūst abu trolejbusu T_1 un T_2 kopējā strāva. T_2 strāvas dēļ kontakttīkla sprieguma kritums attiecībā pret T_1 ir augstāks nekā gadījumā, ja T_2 nebūtu, jo posmā starp apakšstaciju un T_1 strāva priekš T_2 faktiski ir lieka garām plūstoša strāva, kas izraisa papildu sprieguma kritumu. To pašu var teikt par trolejbusa T_1 strāvu attiecībā pret T_2 .



2.9. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posmu shēmas ar diviem trolejbusiem.

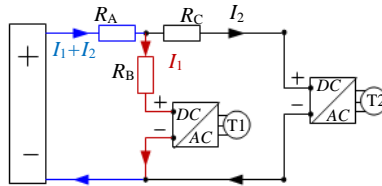
Turpmāk tiks aplūkots situācijas variants, kas redzams 2.9. attēla labajā pusē un kura shēmu var ekvivalenti pārveidot, rezultātā iegūstot 2.10. attēlā redzamo shēmu ar trīs rezistoru zvaigznes slēgumu. Pretestību R_A , R_B un R_C atbilstošās formulas ir šādas:

$$R_A = 2R_k + aR_s + R_s \left(\frac{x}{d}\right), \quad (2.12.)$$

$$R_B = \frac{2R_1R_{1'}}{R_1 + R_{1'} + R_s} = R_s \left(\frac{x}{d}\right) \left(1 - \frac{x}{d}\right), \quad (2.13.)$$

$$R_C = R_s \left(\left(1 - \frac{x}{d}\right) + b - (a + 1) + \left(\frac{x'}{d}\right) \left(2 - \frac{x'}{d}\right) \right), \quad (2.14.)$$

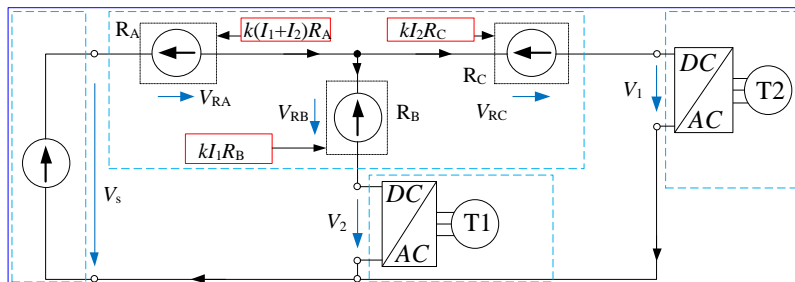
kur $x \in [0; 200]$ – trolejbuss T_1 atrašanās vietas koordināte sekcijā, m;
 $d = 200$ m – kontakttīkla posma sekcijas, kurā atrodas trolejbuss T_1 , garums, m;
 a – koeficients, kas apzīmē sekciju skaitu pirms sekcijas, kurā atrodas trolejbuss T_1 ;
 $x' \in [0; 200]$ – trolejbuss T_2 atrašanās vietas koordināte sekcijā, m;
 b – koeficients, kas apzīmē sekciju skaitu pirms sekcijas, kurā atrodas trolejbuss T_2 .



2.10. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma vienkāršota elektriskā shēma ar diviem trolejbusiem un apakšstaciju, pieslēgtu kontakttīkla posma galā.

Pārvades zudumu modelēšana ar sprieguma avota izmantošanu

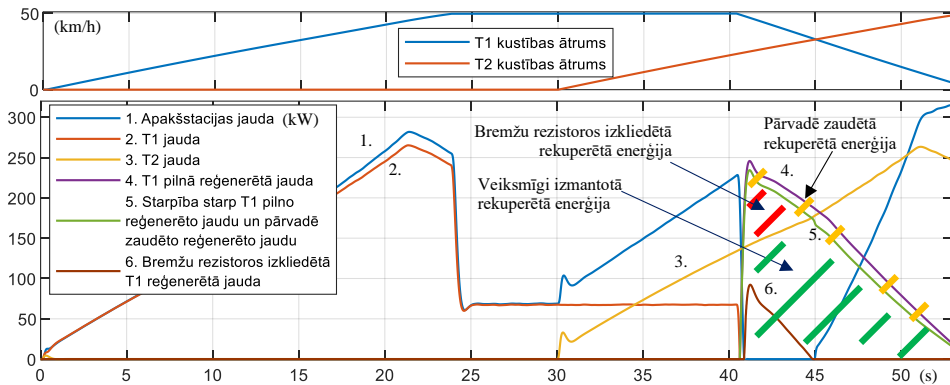
Optimāls variants ir trīs sprieguma avotu izmantošana, kas simulē attiecīgos sprieguma kritumus posmos ar pretestībām R_A , R_B un R_C , kā redzams 2.11. attēla piemērā, kur T_1 un T_2 abi uzņēm ātrumu. Saskaņā ar abu trolejbusu atrašanās vietām reāllaikā tiek aprēķinātas R_A , R_B un R_C , savukārt strāvu vērtības šajos posmos tiek izmērītas ar virtuālajiem ampērmetriem, kuru mērījumi tiek izmantoti avotiem iestatāmo spriegumu aprēķinā. Sprieguma avotiem iestatāmo spriegumu vērtību aprēķināšanas formulas redzamas 2.11. attēlā (sarkanas krāsas rāmīšos), un gala rezultātā pie esošajām trolejbusu piedziņu jaudām un sprieguma kritumiem atbilstošās strāvas I_1 un I_2 no apakšstacijas sprieguma avota ar spriegumu V_s tiek ņemtas automātiski.



2.11. att. Bloks shēma divu trolejbusu modelim ar sprieguma avotiem kontakttīkla sprieguma krituma simulēšanai, kad abi trolejbuss uzņēma ātrumu.

Trolejbūsa rekuperētās jaudas plūsmas simulēšana un rezultātu interpretēšana

Tika veikta divu trolejbusu – T₁ un T₂ – kustības simulācija, pieņemot, ka abiem ir aizpildīts 50 % pasažieru ietilpības; situācijas piemērs redzams 2.11. attēlā. Sākumā T₁ atrodas 0,2 km attālumā no apakšstacijas un uzsāk paātrināšanos līdz 50 km/h, attālinoties no apakšstacijas. 30. sekundē kustību uzsāk T₂, kas atrodas 1,4 km attālumā no apakšstacijas un attālinās no tās. Pēc 40. sekundes T₁ uzsāk bremsēšanu. 2.12. attēlā redzami simulāciju rezultāti ar jaudas diagrammām vienā plaknē. Labākas uzskatāmības dēļ bremsējošā T₁ jauda attēlota skaitļu plaknes pozitīvo vērtību daļā. Energiju reāllaikā aprēķina, integrējot jaudu, tāpēc jaudas plaknē noteikti laukumi atbilst attiecīgās enerģijas apjomam. Kad 30. sekundē kustību uzsāk T₂, apakšstacijas jauda palielinās. Pēc 40. sekundes T₁ rekuperē vairāk jaudas, nekā pieprasa T₂, līdz ar to daļa šīs jaudas tiek izkliedēta bremsžu rezistoros, bet apakšstacijas jaudas patēriņš ir nulle. Līdzko T₁ rekuperē mazāk jaudas par T₂ pieprasīto, tā jauda tiek ņemta no apakšstacijas. Pastāv neskaitāmi situāciju varianti ar bremsējoša trolejbūsa rekuperētās jaudas novadīšanu uz trolejbusu, kas uzņem ātrumu. Šī procesa efektivitāti nosaka trolejbusu savstarpējais attālums un starpība starp jaudu, ko pieprasa viens trolejbuss, un jaudu, ko rekuperē otrs trolejbuss.



2.5. Gaisvadu kontakttīkla temperatūras izmaiņas ietekme uz zudumiem un pilno apakšstacijas enerģijas patēriņu

Lai arī zinātniskajā un tehniskajā literatūrā vadu pretestības aprēķinos pārsvarā tiek pieņemts, ka attiecīgā materiāla temperatūra ir 20 °C, nedrīkst aizmirst arī faktu, ka jebkuram materiālam īpatnējā pretestība ρ ir mainīga atkarībā no temperatūras. Šādā gadījumā kontakttīkla pretestība R , kas aprēķināta pēc 2.1. formulas, mainās proporcionāli ρ izmaiņai. Tāpēc pie noteiktas temperatūras faktisko R var aprēķināt, izmantojot atskaites pretestību R_{ref} , kas šajā gadījumā atbilst 20 °C temperatūrai T_{ref} , savukārt R temperatūrā T aprēķina šādi:

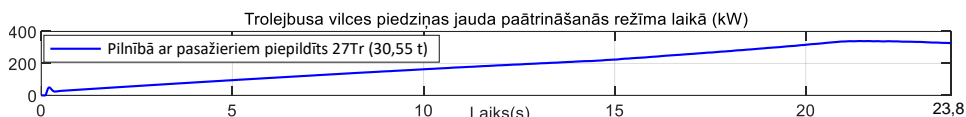
$$R = R_{ref} [1 + \alpha(T - T_{ref})], \quad (2.15.)$$

kur $\alpha = 0,00393$ – vara pretestības termiskais koeficients.

Turpmāk darbā tika pieņemts, ka iepriekš minētā α vērtība attiecas arī uz vadu MF-100, nozīmējot, ka, palielinoties materiāla temperatūrai par 1 °C, pretestība pieaug par 0,393 %. Tika

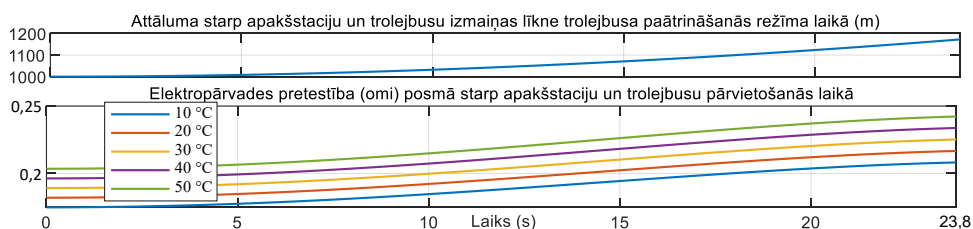
aplūkota trolejbusa “Škoda 27Tr”, kurā aizpildīti 100 % pasažieru vietu, kustība ar vienmērīgu paātrinājumu līdz 50 km/h 23,8 s laikā, salīdzinot pārvadē zaudētās enerģijas apjomu E_z un apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa apjomu E_s pie 0 m, 500 m un 1000 m sākotnējiem attālumiem starp trolejbusu un apakšstaciju. Līdz šim simulācijās pārvades pretestības tika rēķinātas, pieņemot, ka vadu temperatūra ir 20 °C. Taču turpmāk katram no trijiem minētajiem attālumiem E_z un E_s tika salīdzinātas pie piecām dažādām gaisvadu kontakttīkla pretestības līknēm, kas aprēķinātas, izmantojot 2.15. formulu šādā temperatūrā: 10 °C; 20 °C; 30 °C; 40 °C un 50 °C. Aplūkojot 27Tr kustību trīs dažādiem attālumiem piecās temperatūrās katram, sanāk 15 gadījumi, tāpēc, lai nebūtu jāveic 15 simulācijas, skaitliski aprēķini tika veikti ar *MS Excel*.

Katrā no 15 gadījumiem trolejbusa ātruma līknes būs vienādas, tāpēc arī piedziņas jaudas līknes būs vienādas. Pirms aprēķinu veikšanas tomēr ir jāveic viena simulācija, lai iegūtu piedziņas jaudas līkni. Ja 23,8 s ilgai trolejbusa paātrināšanās režīma simulācijai laika solis ir 0,005 s, tad simulācijas laikā tiek ģenerētas 4760 piedziņas jaudas P_d vērtības (šo skaitli iegūst, 23,8 izdalot ar 0,005), kas veido jaudas līkni (2.14. att.).



2.13. att. 27Tr, kurā aizpildīti 100 % pasažieru vietu, jaudas līkne paātrinājuma laikā.

P_d skaitliskās vērtības tiek iekopētas *Excel* dokumentā masīva veidā, kas sastāv no vienas kolonnas ar 4760 rindām, lai turpat varētu veikt pārējos aprēķinus. Vēl aprēķinu veikšanai vajadzīgas piecām dažādām temperatūras vērtībām atbilstošo elektropārvades pretestību R vērtību kolonnas. Attiecīgās R var iegūt gan no simulācijām, gan aprēķinu veidā, izmantojot 2.15. formulu. 2.14. attēlā redzams elektropārvades pretestības līknes piemērs piecās dažādās temperatūrās, ja sākotnējais attālums starp trolejbusu un apakšstaciju ir 1 km.



2.14. att. Pārvades pretestības gaisvadu posmam dažādās vadu temperatūrās.

Zinot P_d , enerģiju, kādu piedziņa patērē laika posmos $t = 0,005$ s, var aprēķināt šādi:

$$E_d = P_d t . \quad (2.16.)$$

Piedziņas jauda P_d rakstīta ar lielo burtu, jo tā katrā sekojošā laika intervālā ar ilgumu $t = 0,005$ s tiek pieņemta kā konstanta. Tas pats attiecas arī uz piedziņas strāvu I un spriegumu V_d . E_d ir enerģija, kas tiek patērēta tikai noteiktā 0,005 s posmā ar noteiktu P_d . Pilnā enerģija E_D , kādu piedziņa patērē paātrināšanās laikā, ir atsevišķu ar 2.16. formulu aprēķināto E_d summa.

$$E_D = \sum_{n=1}^{4760} P_{dn} t = \sum_{n=1}^{4760} E_{dn}. \quad (2.17.)$$

Šo situāciju var uzskatīt par 2.2. apakšnodaļā izvestā strāvas I aprēķināšanas kvadrātvienādojuma saknes praktiskas lietošanas piemēru, jo turpmāko aprēķinu veikšanai ir nepieciešams aprēķināt I katrai P_d 4760 reizes. Elektropārvadē zaudēto enerģiju E_z var aprēķināt katrai P_d 4760 reizes pēc 2.18. formulas.

$$E_z = I^2 R t. \quad (2.18.)$$

2.18. formulā arī $t = 0,005$ s, līdz ar to attiecīgā E_z atbilst tikai tai enerģijai, kas tiek zaudēta noteiktā 0,005 s posmā ar noteiktu I un R . Savukārt pilnā pārvadē zaudētā enerģija E_z visu 23,8 s laikā tiek aprēķināta kā 4760 atsevišķu ar 2.18. formulu aprēķināto E_z summa.

$$E_z = \sum_{n=1}^{4760} I_n^2 R_n t = \sum_{n=1}^{4760} E_{zn}. \quad (2.19.)$$

Ir iespējams iegūt arī apakšstacijas pilnās jaudas patēriņa līkni, aprēķinot tās jaudu 4760 reizes pie attiecīgas P_d , I un R pēc 2.20. formulas ($t = 0,005$ s).

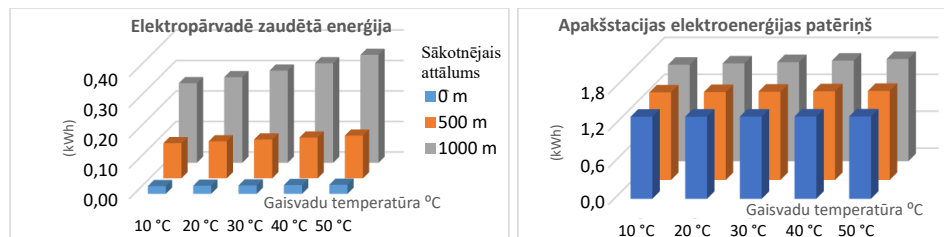
$$P_s = \frac{(I^2 R + P_d) t}{\eta_1 \eta_2}, \quad (2.20.)$$

kur η_1 – apakšstacijas transformatora lietderības koeficients;
 η_2 – apakšstacijas taisngrieža lietderības koeficients.

Apakšstacijas pilno enerģiju E_s , kāda tiek patērēta 23,8 s laikā, var aprēķināt ar dažādām turpmāk uzrakstītām izteiksmēm ($t = 0,005$ s):

$$E_s = \sum_{n=1}^{4760} \frac{(I_n^2 R_n + P_{dn}) t}{\eta_1 \eta_2} = \sum_{n=1}^{4760} \frac{(E_{zn} + E_{dn})}{\eta_1 \eta_2} = \sum_{n=1}^{4760} P_{sn} = \frac{E_z + E_D}{\eta_1 \eta_2}. \quad (2.21.)$$

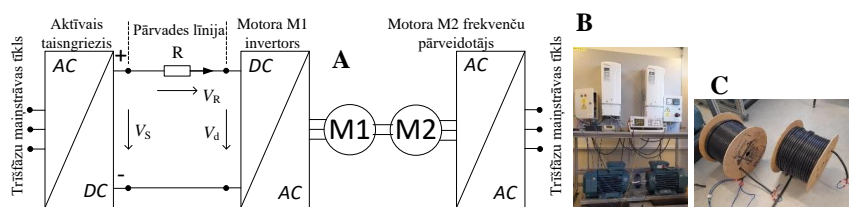
2.15. attēlā redzamas ar E_z un E_s vērtības dažādās gaisvadu temperatūrās. Var secināt, ka gaisvadu temperatūras paaugstināšanās manāmi palielina E_z apjomu, savukārt E_s palielinās nebūtiski, nesasniedzot 5 %. No tā izriet, ka pārvadē zaudētā enerģija veido salīdzinoši mazu daļu no apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa, tāpēc turpmāk veiktajos pētījumos par SC EUS plānošanu kontakttikla pretestība tika rēķināta, pieņemot, ka gaisvadu temperatūra ir 20 °C.



2.15. att. Pārvadē zaudētās enerģijas un apakšstacijas enerģijas patēriņa vērtības.

2.6. Līdzstrāvas līnijas parametru izmaiņu eksperimentāli mērījumi pie ilgstošām konstantām patērētāja jaudām

Līdz šim tika aprakstīts, kā pie mainīga līdzstrāvas līnijas garuma jeb posma starp avotu un patērētāju – trolejbusu – mainās sprieguma kritums un plūstošā strāva, rezultātā nodrošinot nepieciešamo jaudu trolejbusam. Tāpēc ar pieejamo aprīkojumu tika nolemts praktiski pārbaudīt, kā palielinās sprieguma kritums V_R nemainīga garuma līdzstrāvas līnijā vadu temperatūras pieauguma dēļ, ilgstoši darbinot patērētāju – elektrisko dzinēju – ar konstantu jaudu. Tika veikti vairāki eksperimenti, izmantojot dažādu vadu garumu un dzinēja jaudu. Eksperimentu situācijas ir pielīdzināmas stacionāriem enerģijas patērētājiem, piemēram, rūpnīcās esošiem dzinējiem, industriāliem robotiem vai stāvošiem transportlīdzekļiem, kuru barošanas avoti neatrodas tiešā to tuvumā, bet vērā ņemamos attālumos. Ieslēdzot dzinēju un sākot plūst strāvai, līdzstrāvas līnijas vadi sāk pakāpeniski uzsilt, līdz temperatūra sasniedz noteiktu vērtību T_{max} , pie kuras tā vairs nepalielinās un saglabājas nemainīga, ja vien nemainās arī apkārtējās vides temperatūra. Eksperimentālā stenda principiālā shēma redzama 2.16. attēlā, kur rezistors R simbolizē elektropārvades līnijas (+) un (-) vadu kopējo elektrisko pretestību.



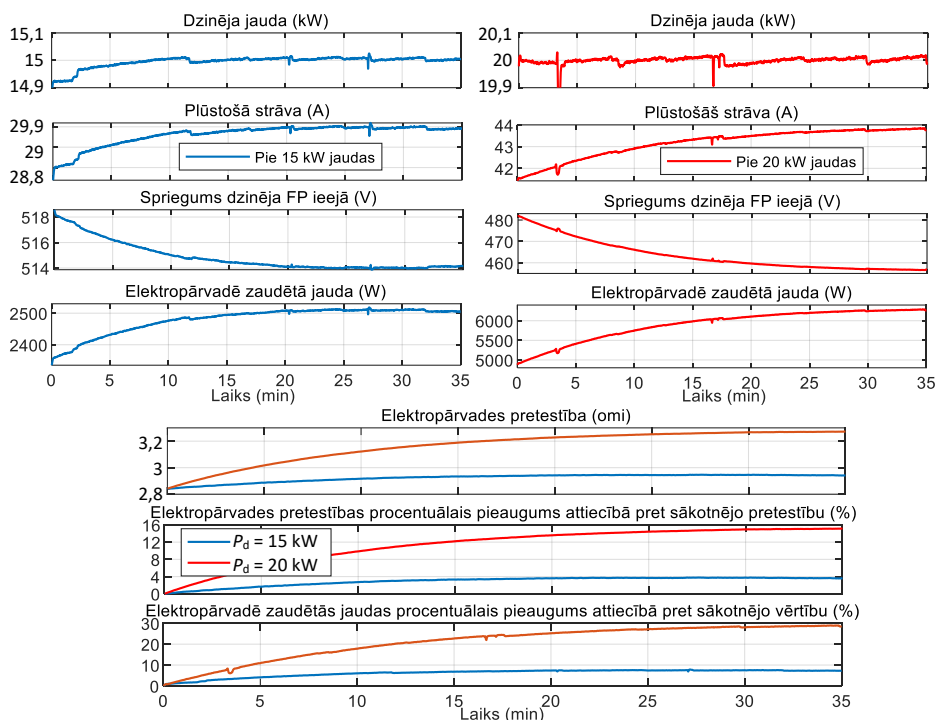
2.16. att. A – mērījumu veikšanas slēguma shēma; B – dzinēju stends; C – saritināti kabeļi.

Tika izmantots divu sajūgtu motoru stends, ko var uzskatīt arī par vilces piedziņas emulatoru, jo M1 ir vilces dzinējs un M2 ir slodzes dzinējs. Mērījumi tika veikti attiecībā pret M1, izmantojot divus aptuveni 100 metru garus kabeļus ar četrām vara 6 mm^2 šķērsriezuma laukuma vadu dzīslām, no kurām tika saslēgtas noteiktu garumu elektropārvades līnijas. Pie augstām strāvām kabeļi tomēr ir obligāti jāizritina, lai tiktu nodrošināta pienācīga dzesēšana, jo, saritināti spolēs, tie var uzkarst līdz kritiski augstai temperatūrai. Kabeļi tika izritināti un izvietoti ārpus laboratorijas telpas pa gaitēņa grīdu, kā redzams 2.17. attēlā, kurā parādīti arī daži ar termogrāfijas kameru uzņemti mērījumu veikšanas gaites kadri. Garas līdzstrāvas līnijas temperatūras mērīšana reāllaikā nav viegli paveicams uzdevums, turklāt vadu temperatūras sadalījums dažādu apstākļu dēļ var būt nevienmērīgs, t. i., atsevišķos vada posmos temperatūra var būt augstāka, atsevišķos – zemāka. Tāpēc dzinēja darbināšanas laikā vadu temperatūra reāllaikā mērīta netika, bet netieši tika mērīts sprieguma kritums līnijā.



2.17. att. Eksperimentu gaitā uzņemti infrasarkanās gaismas kadri un redzamās gaismas kadri.

Ar jaudas analizatoru tika nomērīta līnijas strāva I , izmantojot strāvas šuntu, un spriegums dzinēja invertora ieejā V_d , savukārt jauda dzinēja invertora ieejā P_d tiek aprēķināta kā nomērīto I un V_d reizinājums. Mērījumi tika veikti ik sekundi, tāpēc 35 minūtēs tika iegūtas 2100 parametru I , V_d un P_d vērtības, iegūstot minēto parametru raksturlieknes. Aktīvā taisngrieža spriegums $V_s = 600$ V, savukārt sprieguma kritumu līnijā V_R var aprēķināt kā V_s un V_d starpību. Kad V_d pārstāj samazināties un V_R pārstāj palielināties, var uzskatīt, ka ir sasniegta maksimālā vadu temperatūra, un tās aptuvenās vērtības tika nomērītas ar termogrāfijas kameras palīdzību. Tāpēc pārvades pretestības līknes 35 minūšu periodos tika iegūtas, V_R dalot ar I . 2.18. attēlā redzami mērījumu rezultāti 400 m garai līnijai pie 15 kW un 20 kW patērētāju jaudām.



2.18. att. Rezultātu salīdzinājums 15 kW un 20 kW jaudām, ja līnijas garums ir 400 m.

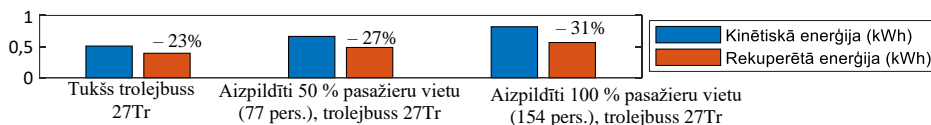
Ekspērimētos aktīvā taisngrieža spriegums bija 600 V, proti, kā trolejbusa kontakttīkla apakšstacijai, tomēr, salīdzinot ar kontakttīkla 100 mm² gaisvadiem, mērījumos izmantotie 6 mm² vadi ir ar būtiski augstāku pretestību. Tāpēc arī pie 15 kW un 20 kW jaudām, kas, no vienas puses, ir krietni zemākas par trolejbusa jaudām, ir ievērojami sprieguma kritumi un zudumi. Tāpēc stacionāru enerģijas patērētāju elektroapgādei, kad barošanas avots atrodas lielākā attālumā, ieteicams ielānēt vadus ar tādiem šķērsgriezuma laukumiem, pie kuriem pārvades zudumi ir pēc iespējas mazāki. Iekārtu instalācijās var pārbaudīt pārvades zudumu apjomu, nomērot spriegumu patērētāja ieejā, un salīdzināt ar barošanas avota spriegumu. Ja starpība ir būtiska, tad ir aktuāli pārvades zudumi, ko varētu samazināt, nomainot esošos vadus ar biežākiem, vai pieslēdzot paralēli papildu vadus.

3. EKONOMISKU MOBILU EUS MĒROGOŠANA REKUPERĒTĀS ENERĢIJAS EFEKTĪVAS IZMANTOŠANAS NODROŠINĀŠANAI

Tika izstrādāta mērogošanas metode tādas mobilas SC EUS plānošanai, kuras izmantošanas mērķis nav nodrošināt garas autonomā režīma distances, bet gan uzkrāt transportlīdzekļa bremzēšanas laikā rekuperēto enerģiju, lai to izmantotu nākamā paātrinājuma režīmā. Turpmāk aprakstīti soļi, kas jāveic šādas ekonomiskas SC EUS mērogošanas un plānošanas gaitā.

Transportlīdzekļa rekuperētās enerģijas apjoma noskaidrošana

Pirmais uzdevums mobilas SC EUS plānošanas gaitā ir noskaidrot, kādu enerģijas apjomu rekuperē aplūkojamais transportlīdzeklis, konkrētajā gadījumā – trolejbuss “Škoda 27Tr”, bremzēdams no maksimāli atļautā 50 km/h kustības ātruma. Veicot simulācijas, tika noskaidrots, ka faktiskais rekuperētās enerģijas apjoms ir nedaudz mazāks par atbilstošo kinētiskās enerģijas apjomu dažādu enerģijas zudumu dēļ, un 3.1. attēlā redzams rekuperētās un kinētiskās enerģijas apjoms dažādām 27Tr noslodzēm. Turpmākajām SC EUS plānošanas darbībām tiks izmantota 27Tr, kurā aizpildīti 100 % pasažieru vietas, rekuperētā enerģija, jo tas ir uzskatāms par maksimālo enerģijas apjomu, kādu mobilajai SC EUS ir jāspēj uzkrāt.



3.1. att. 27Tr rekuperēto un kinētisko enerģiju salīdzinājums.

Nepieciešamā superkondensatoru elementu skaita aprēķināšana

Par mobilas EUS SC elementiem tika izvēlētas Maxwell sērijas 3 V 3400 F šūnas, kas ražotas 2019. gada janvārī un vēl patlaban – 2024. gadā – ir pats jaunākais modelis, kas seko aiz iepriekšējiem 2,7 V 3000 F un 2,85 V 3400 F šūnu modeļiem (3.2. att.).



3.2. att. Cilindrveida superkondensatoru šūnu modeļi.

Līdzsprieguma impulsu pārveidotāja topoloģijas vienkāršošanai minimālais EUS uzlādes stāvokļa spriegums parasti ir noteikts kā puse no maksimālā EUS uzlādes stāvokļa sprieguma, tāpēc izmantojamā SC EUS ietilpība ir 75 % no pilnās ietilpības [26]. Lai noskaidrotu nepieciešamo SC šūnu skaitu, rekuperētās enerģijas apjoms tika salīdzināts ar dažāda skaita SC šūnu kombināciju izmantojamām ietilpībām E_{SC_N} , kas tiek aprēķinātas ar 3.1. formulu.

$$E_{SC_N} = \frac{C_N(V_{\max_N}^2 - V_{\min_N}^2)}{2} \left(\frac{1}{3600000} \right), \quad (3.1.)$$

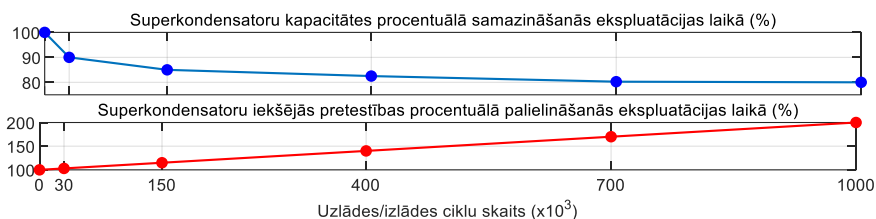
kur N – SC šūnu skaits, gab.;

C_N – kopējā kapacitāte N šūnu slēgumam, F;

V_{\max_N} – maksimāli pieļaujamais uzlādes stāvokļa spriegums N šūnu slēgumam, V;

V_{\min_N} – minimāli pieļaujamais uzlādes stāvokļa spriegums N šūnu slēgumam, V.

Tomēr ir jāreķinās, ka SC ekspluatācijas laikā to iekšējā pretestība R pieaug un kapacitāte C jeb energoietilpība samazinās. No tā var secināt, ka, izvēloties SC EUS, kuras sākotnējā energoietilpība ir vienāda ar rekuperētās enerģijas apjomu, energoietilpība pakāpeniski samazināsies līdz tādiem apjomiem, ka EUS uzlādēsies arvien ātrāk pirms bremsēšanas režīma beigām, tādējādi arvien vairāk rekuperētās enerģijas izkļiedējot bremžu rezistoros. 3.3. attēlā redzama C pakāpeniska samazināšanās par 20 % un iekšējās pretestības R pakāpeniska palielināšanās par 100 % viena miljona uzlādes/izlādes ciklu laikā.



3.3. att. Superkondensatoru parametru pasliktināšanās diagrammas darbmūža laikā.

Ir vērts atzīmēt, ka ne visa rekuperētā enerģija E_r nonāk līdz SC slēgumam, jo vispirms tā iziet cauri vilces piedziņas invertoram un pēc tam – cauri EUS impulsu pārveidotājam, un abās no minētajām iekārtām daļa enerģijas tiek zaudēta. Lai arī pat tāda EUS, kuras energoietilpība ir precīzi vienāda ar rekuperētās enerģijas apjomu, ekspluatācijas sākumā neuzlādēsies līdz galam, tomēr pēc noteikta izmantošanas laika tās energoietilpība būs samazinājusies zem nepieciešamā apjoma. Tāpēc tika rekomendēts plānot tādu SC EUS, kuras sākotnējā energoietilpība E_{EUS} ir par noteiktu apjomu augstāka par maksimālo uzkrājamo E_r . Nepieciešamo E_{EUS} , ņemot vērā energoietilpības samazināšanos, vilces piedziņas invertora un impulsu pārveidotāja lietderības koeficientus η_{inv} un η_{imp} , var aprēķināt pēc 3.2. izteiksmes.

$$E_{EUS} = E_r + (nE_r - (1 - \eta_{inv}\eta_{imp})E_r) = E_r(n + \eta_{tot}), \quad (3.2.)$$

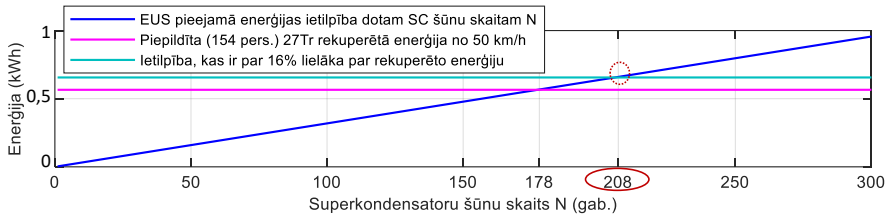
kur $n = 0,2$ – energoietilpības jeb kapacitātes C samazināšanās (par 20 %) apjoma koeficients; η_{tot} – vilces piedziņas invertora un impulsu pārveidotāja kopējais lietderības koeficients.

Pieņemot, ka $\eta_{inv} = 98\%$ un $\eta_{imp} = 98\%$, pēc 3.2. izteiksmes $E_{EUS} \approx 0,66$ kWh. Kā redzams 3.4. attēlā, noskaidrojot nepieciešamo SC šūnu skaitu, ar 3.1. formulu aprēķinātā E_{SC_N} līkne krustojas ar E_{EUS} līkni, kas aprēķināta ar 3.2. formulu, ja SC šūnu skaits ir 208. 3.1. tabulā apkopoti SC EUS parametri, un turpmāk tika pieņemts, ka šī EUS sastāv no diviem paralēli slēgtiem 104 SC šūnu virknes slēgumiem.

3.1. tabula

27Tr EUS, kuras ietilpība ir par 16 % lielāka par rekuperētās enerģijas apjomu, parametri

| | N | V_{\max} (V) | V_{\min} (V) | C (F) | Aktīvā pretestība (Ω) | Izmantojamā ietilpība (kWh) | SC šūnu masa (kg) | EUS pilnā masa (kg) |
|----------|-----|-------------------|-------------------|---------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|
| 27Tr EUS | 208 | 312 | 156 | 65,38 | 0,01248 | 0,663 | 103 | 459 |

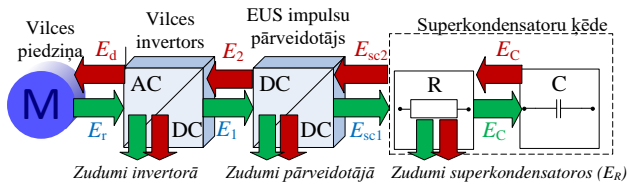


3.4. att. Nepieciešamā EUS superkondensatoru šūnu skaita noteikšana.

3.1. Rekuperētās enerģijas utilizēšanas efektivitāte

Trolejbusa piedziņas bremzēšanas laikā rekuperēta enerģija E_r tiek novadīta SC EUS virzienā, tomēr SC uzlādes procesa laikā daļa no E_r tiek zaudēta, kā redzams 3.5. attēlā (E_r plūsmas ceļš līdz SC EUS). Rezistors R simbolizē SC slēguma iekšējo pretestību R . E_{sc1} ir pēc iziešanas caur invertoru un impulsu pārveidotāju līdz SC slēgumam nonākusi enerģija –

$$E_{sc1} = E_r \eta_{inv} \eta_{imp} = E_r \eta_{tot}. \quad (3.3.)$$

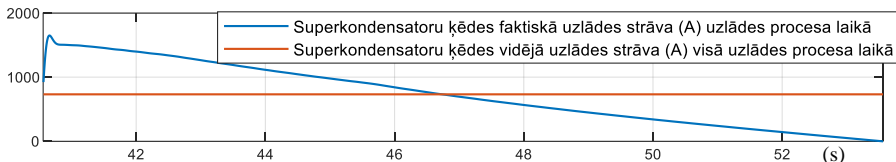


3.5. att. Enerģiju plūsmu ceļi SC EUS uzlādes un izlādes režīmos.

Tika izstrādāta metode, kā var aprēķināt E_R un E_C bez simulāciju veikšanas. E_C ir jāaprēķina, lai varētu aprēķināt uzlādes procesa efektivitāti, kas ir attiecība starp E_C un E_r –

$$\eta_{uz} = \frac{E_C}{E_r}. \quad (3.4.)$$

Lai arī uzlādes procesā caur SC plūstošā strāva ir mainīga, tuvinātu aprēķinu veikšanai var pieņemt, ka visa uzlāde notiek ar konstantu strāvu I_{uz} , kā redzams 3.6. attēlā, kur I_{uz} (sarkanā taisne) atbilst visu faktisko strāvas vērtību (zilā līkne) vidējai vērtībai.



3.6. att. Superkondensatoru ķēdes strāva uzlādes laikā.

Pieņemot, ka SC slēgums ar kapacitāti C un sākotnējo spriegumu V_1 uzlādējas ar konstantu strāvu I_{uz} līdz spriegumam V_2 laikā t , no vispārīgās fizikas zināms, ka I_{uz} aprēķināma šādi:

$$I_{uz} = \frac{C(V_2 - V_1)}{t}. \quad (3.5.)$$

I_{uz} var aprēķināt gan ar 3.5. formulu, gan kā vidējo vērtību 3.6. attēlā redzamās zilās līknes vērtībām, jo abos variantos rezultāti ir praktiski vienādi ar ± 1 % kļūdu. Ja SC uzlādējas no V_1 līdz V_2 , tad E_C var aizvietot ar atbilstošu uzkrātās enerģijas aprēķināšanas formulu, savukārt E_R – ar atbilstošu pretestības R dēļ izkliedētās enerģijas aprēķināšanas formulu šādi:

$$E_{SC} = E_C + E_R = \frac{C(V_2^2 - V_1^2)}{2} + \left(\frac{C(V_2 - V_1)}{t} \right)^2 R t. \quad (3.6.)$$

Vienkāršojot 3.6. formulu, tiek iegūta 3.7. formula –

$$E_{SC1} = \frac{C((V_2^2 - V_1^2)t + (V_2 - V_1)^2 CR)}{2t}. \quad (3.7.)$$

Par to, vai SC slēgums konkrētajā situācijā uzlādējas līdz maksimālam spriegumam V_{max} , ir iespējams pārliecināties, 3.6. un 3.7. izteiksmē V_2 aizvieto ar $V_{max} = 312$ V. Ja $E_1 > E_{SC1}$, tad SC slēgums uzlādējas līdz V_{max} , jo E_1 un E_{SC1} starpība ir bremžu rezistoros izkliedētā enerģija. Ja $E_1 < E_{SC}$, tad SC ķēde neuzlādējas līdz V_{max} , tāpēc no 3.7. formulas ir jāizved V_2 formula. Vienādojot 3.7. formulas saucējus, var iegūt kvadrātvienādojumu V_2 aprēķinam.

$$C(t + 2CR)V_2 - 4C^2RV_1V_2 + 2C^2RV_1^2 - CtV_1^2 - 2E_{SC1}t = 0. \quad (3.8.)$$

3.8. formulas saknei, kas atbilst faktiskajai V_2 vērtībai, ir pluss zīme pirms kvadrātsaknes izteiksmes –

$$V_2 = \frac{4C^2RV_1 + \sqrt{(4C^2RV_1)^2 - 4C(t + 2CR)(2C^2RV_1^2 - CtV_1^2 - 2E_{SC1}t)}}{2C(t + 2CR)}. \quad (3.9.)$$

Izlādes laikā SC slēguma izlādētā enerģija ir E_C . Līdz piedziņai nonākušī enerģija E_d ir šāda:

$$E_d = E_{SC2}\eta_{imp}\eta_{inv} = E_{SC2}\eta_{tot}. \quad (3.10.)$$

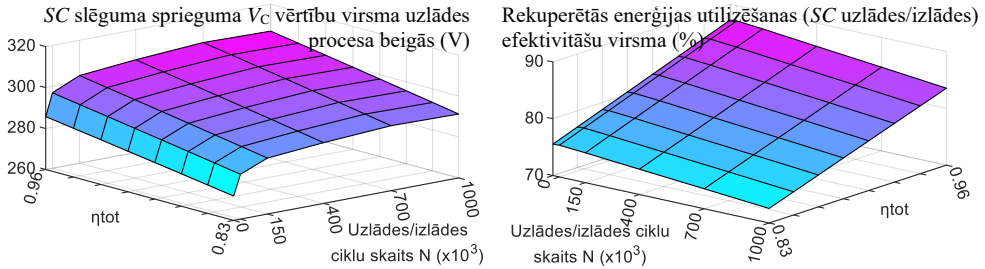
Izlādes procesa efektivitāti var aprēķināt kā E_d un E_C dalījumu –

$$\eta_{iz} = \frac{E_d}{E_C}. \quad (3.11.)$$

E_r utilizēšanas jeb pilnā SC uzlādes/izlādes procesa efektivitātei atbilstošā formula ir šāda:

$$\eta_{uz/iz} = \frac{E_d}{E_r}. \quad (3.12.)$$

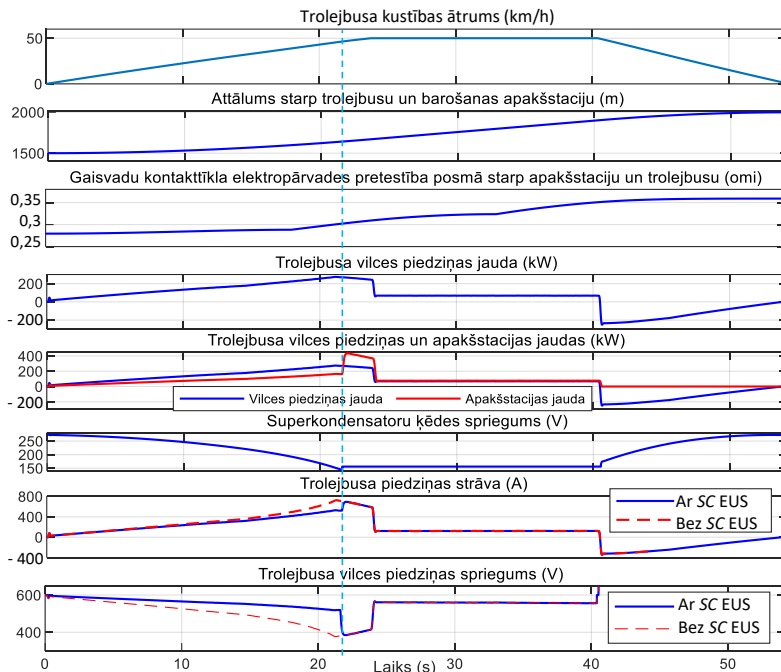
3.7. attēla kreisajā pusē redzami SC spriegumi uzlādes režīma beigās, ja notiek 27Tr bremzēšana no 50 km/h, atkarībā no SC šūnu nolietojuma un no vilces piedziņas invertora un impulsu pārveidotāja kopējā lietderības koeficienta. Redzams, ka maksimālais EUS spriegums uzlādes procesā sasniegts netiek, taču piemērā ar augstāko η_{tot} pie miljonā uzlādes/izlādes cikla V_{max} ir ļoti tuvu maksimālajam 312 V spriegumam. Apskatot diagrammu 3.7. attēla labajā pusē, var secināt, ka invertora un impulsu pārveidotāja efektivitātes atstāj manāmu ietekmi uz E_r utilizēšanu, tāpēc rekomendējams izvēlēties iekārtas ar pēc iespējas augstākiem η . Tāpēc turpmākos aprēķinos tika pieņemts, ka $\eta_{inv} = 98$ % un $\eta_{imp} = 98$ %, rezultējoties ar $\eta_{tot} = 96,04$ %.



3.7. att. SC uzlādes beigu sprieguma un rekuperētās enerģijas utilizēšanas efektivitātes virsmas.

3.2. Mobilas superkondensatoru EUS optimālas izlādes vadības stratēģijas un to efektivitāšu salīdzinājums

Par izpētes pamatu tika ņemta ar līdz šim aprēķināto mobilo EUS aprīkota 27Tr, kurā ir aizpildīti 50 % pasažieru vietu, kustība ar paātrināšanos līdz 50 km/h un bremsēšanu, kā redzams 3.8. attēlā, rekuperējot 0,493 kWh, no kurām 0,458 kWh tiek veiksmīgi uzkrātas EUS, uzlādējot to no 156 V līdz 273 V. Tāpēc katrā 27Tr paātrināšanās simulācijā pieņemtais EUS sākuma spriegums bija 273 V. 27Tr sākotnēji atradās 1,5 km attālumā no apakšstacijas, no kuras kustības laikā attālinājās. Situācijā, kas redzama 3.8. attēlā, EUS jau kopš kustības iesākšanas nodrošina piedziņu ar 50 % nepieciešamās jaudas, taču EUS izlādējas līdz minimālajam spriegumam aptuveni 2 s pirms paātrināšanās beigām, tādējādi izraisot apakšstacijas jaudas pīķi. Kad EUS izlādējusies, strauji samazinās piedziņas spriegums sakarā ar gaisvadu līnijas sprieguma krituma palielināšanos, ko izraisa no apakšstacijas ņemtās strāvas pieaugums.



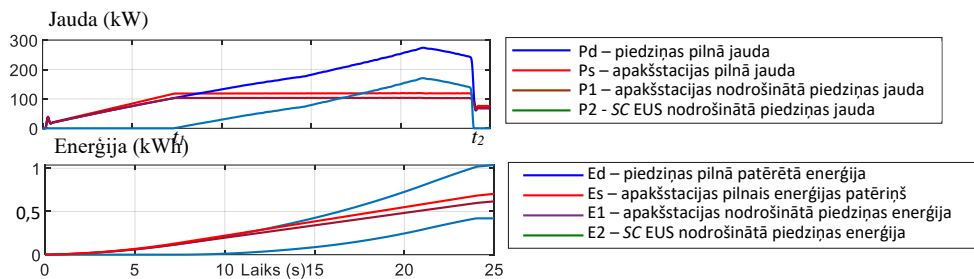
3.8. att. Trolejbuss kustības un SC izlādes/uzlādes simulācijas rezultātu līknes.

Ņemot vērā to, ka piedziņa vairāk jaudas patērē paātrināšanās režīma beigu posmā, vajadzētu izstrādāt un izmantot tādas EUS izlādes stratēģijas, kur EUS aktīvi iesaistās piedziņas jaudas apgādē paātrināšanās režīma beigu posmā, jo pie augstākām no tīkla ņemtām jaudām pārvades zudumi attiecīgi ir augstāki nekā, piemēram, pie zemākām jaudām kustības sākumā. Ja EUS spēj piedalīties jaudas nodrošināšanā paātrināšanās beigās, tad apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa ietaupījumi ir augstāki, jo tie iekļauj ne tikai piedziņas pilnās jaudas daļu, ko nodrošina EUS, bet arī novērsto pārvades un apakšstacijas iekšējos zudumus, kādi būtu bez EUS iesaistes.

SC izlādes stratēģija ar apakšstacijas jaudas piķa ierobežošanu

No trolejbusa kustības uzsākšanas sākuma momenta t_0 līdz laikam t_1 piedziņai nepieciešamo jaudu nodrošina tikai apakšstacija (3.9. att.). Laika momenta t_1 , kad piedziņas jauda sasniedz vērtību P_C , piedziņas jaudas apgādē sāk iesaistīties arī SC EUS, savukārt no apakšstacijas visu atlikušo paātrināšanās režīmu tiek nodrošināta konstanta jauda, kas vienāda ar P_C . Intensitāte k , ar kādu SC EUS laikā no t_1 līdz t_2 tiek izlādēta, tiek aprēķināta šādi:

$$k = \frac{p_d - P_c}{p_d} \quad (3.13.)$$

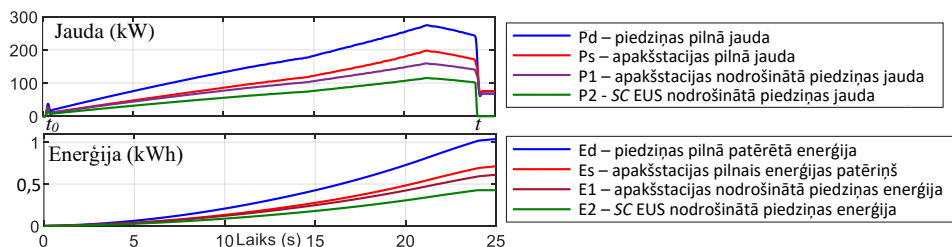


3.9. att. Simulācijas rezultāti SC izlādes stratēģijai ar apakšstacijas jaudas piķa ierobežošanu.

SC izlādes stratēģija ar konstantu izlādes proporcionalitāti

No trolejbusa kustības uzsākšanas sākuma momenta t_0 līdz laikam t piedziņai nepieciešamo jaudu nodrošina gan apakšstacija, gan EUS ar nemainīgu sadalījumu (3.10. att.). Izlādes intensitāte jeb proporcionalitāte atbilst koeficientam k , kas nosaka, kādu daļu no piedziņas jaudas p_d veido no EUS nodrošinātā jauda p_2 , kuru reāllaikā aprēķina šādi:

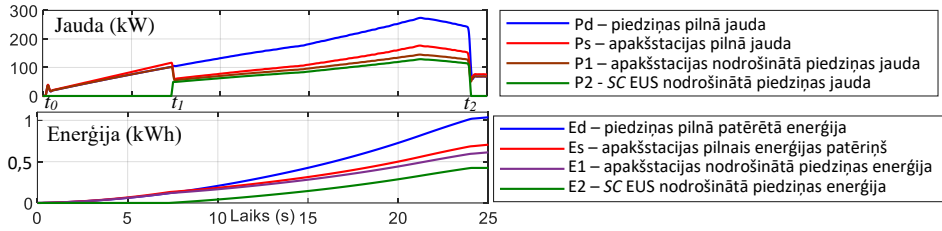
$$p_2 = k p_d \quad (3.14.)$$



3.10. att. Simulācijas rezultāti SC izlādes stratēģijai ar konstantu izlādes intensitāti.

SC vēlākas izlādes stratēģija ar konstantu izlādes proporcionalitāti

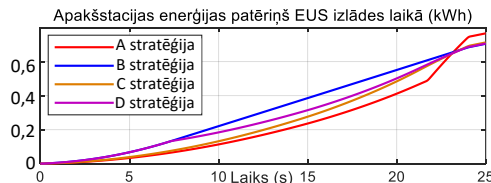
No trolejbusa kustības uzsākšanas sākuma momenta t_0 līdz laikam t_1 piedziņai nepieciešamo jaudu nodrošina tikai apakšstacija (3.11. att.), bet momentā t_1 , kad piedziņas jauda sasniedz noteiktu vērtību P_a , jaudas apgādē sāk iesaistīties arī EUS tā, ka no t_1 līdz t_2 piedziņu ar jaudu apgādā gan apakšstacija, gan EUS ar nemainīgu sadalījumu jeb k .



3.11. att. Simulācijas rezultāti SC izlādes stratēģijai ar vēlāku izlādes uzsākšanu.

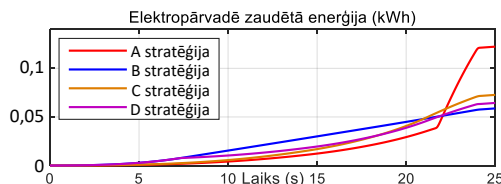
SC izlādes stratēģiju efektivitāšu salīdzinājums

Turpmāk uz situāciju, kas redzama 3.8. attēlā, autors atsauksies kā uz A stratēģiju, 3.9. attēlā redzamā situācija tiks definēta kā B stratēģija, 3.10. attēlā – C stratēģija, 3.11. attēlā – D stratēģija. Visos gadījumos paātrinājuma režīmā EUS tika pilnībā izlādēta. 3.12. attēlā redzams, ka A stratēģijas gadījumā brīdī, kad EUS izlādējas, apakšstacijas enerģijas patēriņš strauji pieaug, un rezultātā šī ir visneefektīvākā stratēģija, salīdzinot ar pārējām, kas izskatās savstarpēji līdzvērtīgas, ja ņem vērā apakšstacijas enerģijas patēriņa līknes, kas paātrinājuma režīma beigās ir gandrīz pārklājušās.



3.12. att. Apakšstacijas patērētās enerģijas līknes katrai SC izlādes stratēģijai.

3.13. attēlā redzamās pārvadē zaudētās enerģijas līknes ļauj precīzāk salīdzināt stratēģijas. Skaitliski visefektīvākā ir B stratēģija, kas zudumu samazināšanas ziņā ir par aptuveni 52 % efektīvāka par A stratēģiju, taču, vadoties pēc apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa (3.12. att.), no kura pārvadē zaudētā enerģija veido vien nelielu daļu, B stratēģija ir par 8 % efektīvāka par A stratēģiju. Savukārt C un D stratēģija ir par aptuveni 1 % neefektīvāka par B stratēģiju.



3.13. att. Pārvadē zaudētās enerģijas līknes katrai no aplūkotajām SC izlādes stratēģijām.

3.3. Mobilas superkondensatoru EUS masas ietekme uz transportlīdzekļa pilno enerģijas patēriņu

Nedrīkst aizmirst, ka trolejbusa aprīkošana ar mobilu EUS papildus nozīmē arī trolejbusa pilnās masas palielināšanos, līdz ar to trolejbuss paliek noslogotāks un kustības laikā patērē vairāk enerģijas. Taču līdz šim nav ticis pētīts, cik lielā mērā palielinās elektriskā transporta enerģijas patēriņš mobilas EUS masas dēļ un vai šis pieaugums uzskatāms par būtisku uz visas atgūstamās un izmantojamās rekuperētās enerģijas fona. Tāpēc tika nolemts ar simulāciju palīdzību izpētīt mobilas EUS masas ietekmi ne vien uz piedziņas patēriņu paātrināšanās laikā, bet arī uz apakšstacijas pilnās enerģijas patēriņu gadījumā, ja EUS nepiedalās piedziņas apgādē ar jaudu. EUS masas aprēķinā tika pieņemts, ka impulsu pārveidotāja masa ir $m_{imp} = 200$ kg. Vienas SC šūnas masa ir $m_{sc} = 520$ g, taču uz vienu SC šūnu ir vēl papildu $m_d = 750$ g, kas iekļauj dažādas kopnes, stiprinājumus, balansēšanas ķēdes un ventilācijas sistēmas utt. Līdz ar to pilnā EUS masa aprēķināma pēc 3.15. formulas, kur SC šūnu skaits $N = 208$ (3.1. tab.).

$$m_{EUS} = N(m_{sc} + m_d) + m_{imp}. \quad (3.15.)$$

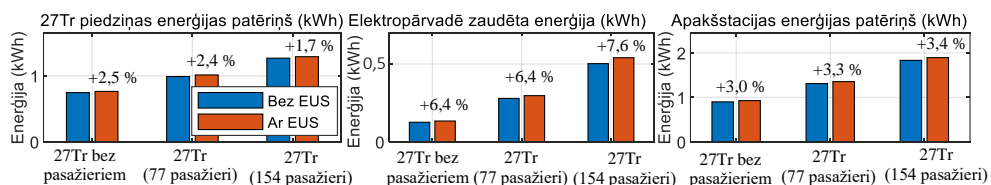
Saskaņā ar 3.15. formulu SC EUS masa ir 459 kg. 3.2. tabulā redzams 27Tr bez mobilas EUS un 27Tr ar mobilu EUS pilno masu procentuāls salīdzinājums tukša trolejbusa, tāda trolejbusa, kurā ir aizpildīti 50 % pasažieru vietu, un trolejbusa, kurā ir aizpildīti 100 % pasažieru vietu, gadījumā. EUS vislielāko ietekmi uz trolejbusa pilno masu atstāj tukša 27Tr gadījumā, jo šeit EUS masa veido lielāku daļu no pilnās masas, salīdzinot pārējiem variantiem.

3.2. tabula

Trolejbusa 27Tr masa

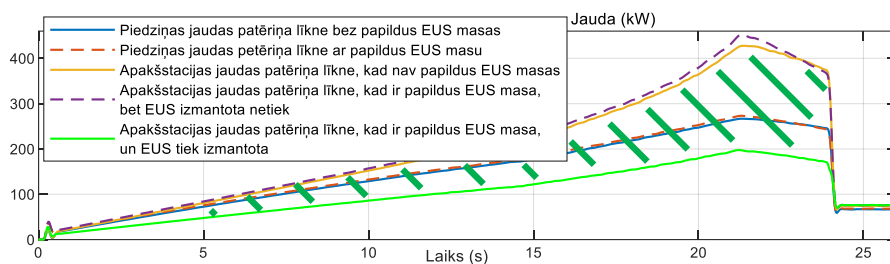
| | |
|--|---------------------|
| Tukša trolejbusa masa | 19 000 kg |
| Tukša trolejbusa masa + EUS masa | 19 459 kg (+ 2,4 %) |
| Trolejbusa, kurā ir aizpildīti 50 % pasažieru vietu, masa (77 pasažieri) | 24 775 kg |
| Trolejbusa, kurā ir aizpildīti 50 % pasažieru vietu, masa + EUS masa | 25 234 kg (+ 1,9 %) |
| Trolejbusa, kurā ir aizpildīti 100 % pasažieru vietu, masa (154 pasažieri) | 30 550 kg |
| Trolejbusa, kurā ir aizpildīti 100 % pasažieru vietu, masa + EUS masa | 31 009 kg (+ 1,5 %) |

Tika veiktas 27Tr kustības simulācijas ar paātrināšanos no 0 km/h līdz 50 km/h 23,8 s laikā. 3.14. attēlā redzami salīdzināšanas rezultāti. Papildu EUS masas dēļ visvairāk palielinās pārvadē zaudētā enerģija, un visos gadījumos pieaugums ir virs 5 %. Taču, ņemot vērā to, ka pārvadē zaudētā enerģija veido nelielu daļu no pilnā apakšstacijas enerģijas patēriņa, pilnais apakšstacijas enerģijas patēriņš papildu EUS masas dēļ palielinās robežās zem 3,5 %. Turklāt šī atšķirība ir aktuāla tikai tad, ja EUS izmantota netiek, proti, vienkārši atrodas uz transportlīdzekļa borta.



3.14. att. Enerģijas patēriņu salīdzinājumi pie paātrināšanās līdz 50 km/h ar un bez EUS masas.

3.15. attēlā uzskatāmi redzamas jaudu līknes 27Tr, kurā aizpildīti 50 % pasažieru vietu, kad tas sākumā atrodas 1,5 km attālumā no apakšstacijas un paātrinās līdz 50 km/h gadījumiem ar EUS izmantošanu (C stratēģija) uz bez EUS. Pateicoties EUS izmantošanai, apakšstacijas jaudas patēriņš ir ievērojami mazāks, savukārt ar zaļām svītrām iezīmētais laukums (3.15. att.), ko ierobežo apakšstacijas jauda gadījumā bez EUS (dzeltenā līkne) un apakšstacijas jauda gadījumā ar EUS (zaļā līkne), uzskatāms par ietaupītās apakšstacijas enerģijas apjomu, kas šajā gadījumā no kustības uzsākšanas brīža līdz paātrināšanās režīma beigām veido aptuveni 48 %. No tā var secināt, ka EUS izmantošanas gadījumā apakšstacijas enerģijas patēriņa ietaupījums būtiski atsvēr mobilas EUS galveno trūkumu – transportlīdzekļa pilnās masas pieaugumu.



3.15. att. Jaudu diagrammu salīdzinājums situācijās ar un bez EUS.

3.4. Mobilas superkondensatoru EUS izmantošanas rezultātā ietaupīto finansiālo līdzekļu aprēķins

Mobilas SC EUS izmantošanas sākuma posmu var uzskatīt par atmaksas periodu, kas ilgst līdz brīdim, kad EUS izmantošanas rezultātā izmantotās rekuperētās enerģijas apjoms naudas izteiksmē atbilst EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksām. Pēc minētā perioda beigām var teikt, ka EUS netieši nes peļņu uz turpmāk izmantotās rekuperētās enerģijas cenas rēķina, salīdzinot ar gadījumu bez EUS. Promocijas darbā tika izvirzīts priekšlikums, kā tuvināti aprēķināt pilno enerģijas apjomu, kādu EUS var uzkrāt visā tās ekspluatācijas laikā, t. i., tikt uzlādēta un izlādēta līdz brīdim, kad tās kapacitāte C ir samazinājusies par 20 % un iekšējā pretestība R ir palielinājusies par 100 %. Turpmāk aprakstītās EUS nestās peļņas aprēķinam tika izmantots pilns 27Tr, kas ieskrējieni līdz 50 km/h un bremsēšanu veic vienu miljonu reizu – tieši tik reizes SC šūna var tikt uzlādēta/izlādēta, kas tiek uzskatīts par darbmūžu. Saskaņā ar ražotāja sniegto informāciju šis 10^6 uzlādes/izlādes ciklu skaits attiecas uz pilnu uzlādi/izlādi, tomēr jāatgādina, ka trolejbusa gadījumā mobilā SC EUS tiek izlādēta līdz pusei no maksimālā sprieguma. Taču, ņemot vērā to, ka mobilās SC EUS darba temperatūra var būt arī virs nominālajiem 25 °C, paātrinot SC šūnu nolietošanu, tad tās uzlāde no $V_{\min} = 0,5 V_{\max}$ līdz V_{\max} un izlāde no V_{\max} līdz $V_{\min} = 0,5 V_{\max}$ turpmāk tiks uzskatīta par pilnu uzlādes/izlādes ciklu.

SC ekspluatācijas laikā izmantotās trolejbusa rekuperētās enerģijas tuvināts aprēķins

Veicot simulāciju, tika noskaidrots, ka vienas bremsēšanas laikā 27Tr ar aizpildītiem 100 % pasažieru vietu rekuperē aptuveni 0,562 kWh enerģijas. Līdz ar to miljons reizēs šāds 27Tr rekuperē 562 000 kWh enerģijas. Pieņemot, ka cena par 1 kWh ir, piemēram, 0,15 eiro,

aprēķinātā rekuperētās enerģijas apjoma cena ir 84 300 eiro, kas ir pietiekami liela summa mobilas SC EUS izmantošanas iespējas apsvēršanai. Saprotams, ka faktiskā ietaupītās enerģijas cena būs zemāka par minēto summu rekuperētās enerģijas zudumus dēļ, piemēram, invertorā, impulsu pārveidotājā, kā arī SC iekšējās pretestības dēļ. Tāpēc nākamais solis ir aprēķināt cenu tai rekuperētās enerģijas daļai, kas EUS darbmūža laikā veiksmīgi tiek izmantota 27Tr pēc piedziņas bremsēšanas sekojošā ieskrējiena režīmā.

3.16. attēlā redzamas pilnās rekuperētās enerģijas līknes, kas raksturo 27Tr, kurā aizpildīti 100 % pasažieru vietu un kas brauc ar ātrumu 50 km/h: sarkanā līkne – veiksmīgi uzkrātā rekuperētās enerģijas daļa; zaļā līkne – rekuperētās enerģijas daļa, kas veiksmīgi izmantota pēc bremsēšanai sekojošā paātrinājuma, laikā no 1. līdz 10^6 EUS uzlādes/izlādes ciklam. Izmantojot datus, kas redzami uz zaļās līknes, var aprēķināt pilno veiksmīgi izmantoto rekuperēto enerģiju visā EUS ekspluatācijas laikā, jo šai enerģijai atbilst ar biežākām zaļām līnijām iezīmētais plaknes laukums (3.16. att.), ko augšpusē norobežo zaļā līkne. Izmantojot trapeču metodi, var aprēķināt kopējo enerģijas apjomu, kādu pēc bremsēšanas režīmiem vilces piedziņa izmanto nākamajos ieskrējiena režīmos EUS darbmūža laikā. Veiksmīgi realizētās rekuperētās enerģijas laukums tiek sadalīts piecās trapecēs, katrai atsevišķi tiek aprēķināti laukumi, kas pēc tam tiek summēti. Piemēram, laukums S_3 tiek aprēķināts pēc trapeces laukuma aprēķināšanas izteiksmes

$$S_3 = E_{EUS,S_3(kWh)} = \left(\frac{ab + cd}{2} \right) ad, \quad (3.16.)$$

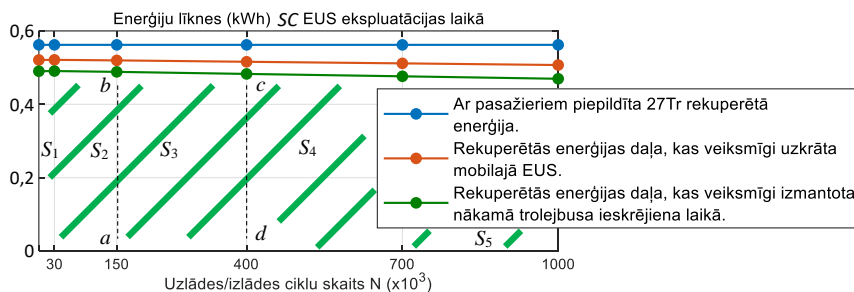
kur ab – veiksmīgi absorbētās enerģijas apjoms 150. tūkstošajā ciklā, kWh;

dc – veiksmīgi absorbētās enerģijas apjoms 400. tūkstošajā ciklā, kWh;

ad – ciklu skaits starp 150 tūkst. un 400 tūkst. cikliem, cikli.

Tieši tādā pašā veidā tiek aprēķināti arī visu pārējo trapeču laukumi. Savukārt pilnais lietderīgi izmantotās enerģijas apjoms tiek aprēķināts kā attiecīgo trapeču laukumu summa –

$$E_{EUS} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5. \quad (3.17.)$$



3.16. att. Uzkrātās un izmantotās rekuperētās enerģijas līknes mobilas EUS darbmūžā.

Saskaņā ar aprēķinu rezultātiem EUS ekspluatācijas laikā veiksmīgi izmantotās kopējās enerģijas apjoms ir $E_{EUS} = 514\,434$ kWh, kas uzskatāms par rekuperētās enerģijas uzkrāšanas un izmantošanas rezultātā gūtu netiešu piedziņas enerģijas patēriņa ietaupījumu, kas mobilas EUS neesamības gadījumā tiktu patērēts no apakšstacijas.

Superkondensatoru izmantošanas rezultātā prognozējamās nestās peļņas aprēķins

Ar EUS iegādi un uzstādīšanu saistītie izdevumi ir atpelnīti tajā brīdī, kad kopš eksploatācijas sākuma izmantotās rekuperētās enerģijas apjomam atbilstošā naudas summa atbilst EUS sākotnējo izmaksu un uzstādīšanas izdevumu summai, kas tiek aprēķināta šādi:

$$K_{EUS} = NK_{SC}k, \quad (3.18.)$$

kur N – SC šūnu skaits, gb.;

K_{SC} – vienas SC šūnas cena, eiro;

$k = 2$ – impulsu pārveidotāja un SC instalācijas izmaksu koeficients [27], [28].

Enerģijas patēriņa samazinājumu naudas izteiksmē visā EUS eksploatācijas laikā, ņemot vērā tikai piedziņas rekuperētās enerģijas izmantošanu, var aprēķināt ar 3.19. formulu.

$$K_d = E_{EUS}K_{kWh} - K_{EUS}, \quad (3.19.)$$

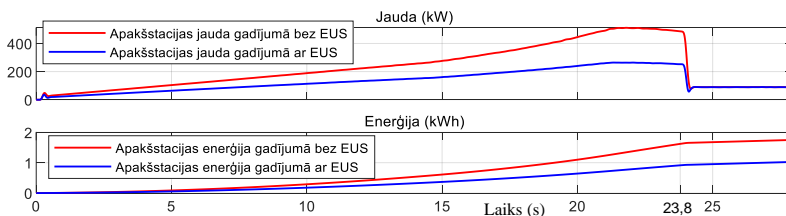
kur E_{EUS} – veiksmīgi izmantotās rekuperētās enerģijas apjoms SC darbmūža laikā, kWh;

K_{kWh} – elektroenerģijas cena par kWh, eiro.

Tomēr ar 3.19. formulu vēl netiek aprēķināta naudas summa pilnajai apakšstacijas ietaupītajai enerģijai, kas iekļauj ne tikai izmantoto rekuperēto enerģiju E_{EUS} , bet arī pārvades un apakšstacijas iekšējo zudumu samazinājumu, pateicoties tam, ka no apakšstacijas tiek nodrošināts mazāks jaudas apjoms. Lai veiktu pilna apakšstacijas enerģijas patēriņa samazinājuma E_s aprēķinu naudas izteiksmē K_s visā EUS eksploatācijas laikā, tika ierosināts vispirms veikt trolejbusa 27Tr, kurā aizpildīti 100 % pasažieru vietu, bez mobilas EUS kustības simulāciju un reģistrēt apakšstacijas enerģijas patēriņu paātrināšanās režīma beigās, pēc tam – 27Tr, kurā aizpildīti 100 % pasažieru vietu, ar mobilu EUS kustības simulāciju un reģistrēt apakšstacijas enerģijas patēriņu paātrināšanās režīma beigās. Starpība starp pirmo un otro gadījumu būs E_s , un tā naudas vērtību K_s visā EUS eksploatācijas laikā var aprēķināt šādi:

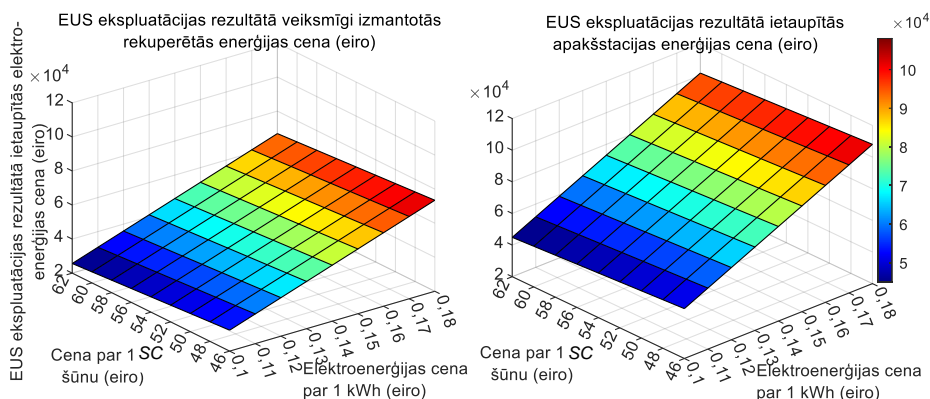
$$K_s = E_s K_{kWh} - K_{EUS}. \quad (3.20.)$$

Lai veiktu tuvinātus aprēķinus, tika pieņemts, ka vidējais apakšstacijas un trolejbusa savstarpējais attālums ir 1 km, un tika veikta 27Tr, kurā aizpildīti 100 % pasažieru vietu, kustības simulācija. 3.17. attēlā redzami simulāciju rezultāti situācijām bez mobilas EUS un ar mobilu EUS, kas tika izlādēta saskaņā ar konstantas izlādes proporcionalitātes stratēģiju. Apakšstacijas patērēto enerģiju starpība starp abiem gadījumiem ir 0,7066 kWh. Līdz ar to, lai iegūtu E_s vērtību visā EUS eksploatācijas laikā, minētais skaitlis jāreizinā ar 10^6 . Tad $E_s = 706\,600$ kWh, kas ir vairāk, salīdzinot ar $E_{EUS} = 514\,434$ kWh.



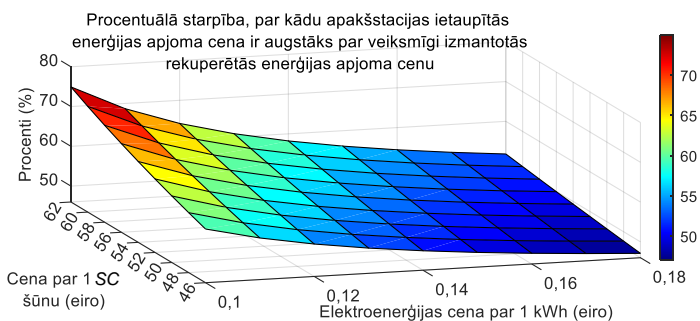
3.17. att. Simulācijas rezultātu diagrammas.

EUS nesto peļņu apjomi ekspluatācijas laikā tika aprēķināti, pieņemot, ka elektroenerģijas cena par kWh var mainīties robežās no 0,1 eiro līdz 0,18 eiro un vienas SC šūnas iespējamā cena var mainīties robežās no 46 eiro līdz 62 eiro. 3.18. attēla kreisajā pusē redzams EUS nestās peļņas apjoms, kas aprēķināts, izmantojot 3.19. formulu, ņemot vērā tikai izmantoto rekuperēto enerģiju, labajā pusē – EUS nestās peļņas apjoms, kas aprēķināts, izmantojot 3.20. formulu, ņemot vērā apakšstacijas pilno enerģijas ietaupījumu. EUS nestā peļņa ir jāsaprot nevis kā tieši finansiāli ienākumi, bet kā elektroenerģijas patēriņa rēķinos uzrādīto izmaksu samazinājums.



3.18. att. Enerģijas ietaupījumi naudā, pateicoties mobilas EUS izmantošanai.

Tātad finansiālo līdzekļu ietaupījums ir manāmāks, ja aprēķinos ņem vērā ne tikai izmantoto rekuperēto enerģiju E_{EUS} , bet arī pilno apakšstacijas enerģijas patēriņa samazinājumu E_S , skatoties uz atšķirību salīdzināšanas grafiku (3.19. att.). Procentuālā starpība starp E_S un E_{EUS} cenām ir augstāka pie zemākām elektroenerģijas cenām un augstākām SC šūnu jeb EUS kopējām iegādes/uzstādīšanas cenām. Cena par vienu SC šūnu un elektroenerģijas cena par kWh tika noteikti par mainīgiem lielumiem, tādējādi iegūstot trīs dimensiju grafikus. 3.18. attēlā redzams, ka EUS finansiālo atdevi ietekmē elektroenerģijas cena par kWh krietni vairāk nekā EUS kopējā cena. No tā izriet, ka rekuperētās enerģijas izmantošana ar EUS palīdzību var būt finansiāli ļoti izdevīga elektroenerģijas cenas inflācijas gadījumos, taču pie elektroenerģijas cenas samazināšanās EUS atmaksas periods būs ilgāks un pēc tā sekojošā finansiālā atdevē jeb ietaupītās enerģijas apjoma cena būs mazāka.

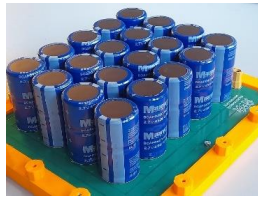


3.19. att. Apakšstacijas ietaupītās enerģijas un izmantotās rekuperētās enerģijas cenu starpība.

4. SUPERKONDENSATORU KONSTANTAS JAUDAS UN KONSTANTAS STRĀVAS UZLĀDES/IZLĀDES METOŽU EFEKTIVITĀŠU SALĪDZINĀJUMS

Liela mēroga SC EUS plānošanas, aprēķinu un modelēšanas gaitā visbiežāk tiek izmantots RC ķēdes modelis, kas ekvivalenti aizvieto reālu SC ķēdi [29].

Aprēķinu un simulāciju veidā tika salīdzinātas efektivitātes uzlādei ar konstantu strāvu un uzlādei ar konstantu jaudu SC ieejā, efektivitātes izlādei ar konstantu strāvu un izlādei ar konstantu patērēto jaudu un arī abu minēto metožu pilnās uzlādes/izlādes efektivitātes uz RC modeļa bāzes. Simulācijas tiks veiktas, balstoties 20 virknē slēgtu SC šūnu *Maxwell BCAP0450 P270 S18* slēgumā, kas redzams 4.1. attēlā. Vadoties pēc ražotāja tehniskās dokumentācijas, vienas SC šūnas $C = 450 \text{ F}$, $R = 2,8 \text{ m}\Omega$, maksimālais spriegums $V_C = 2,7 \text{ V}$. Līdz ar to 29 SC šūnu virknes slēgumam $C = 22,5 \text{ F}$, $R = 0,056 \Omega$, $V_C = 54 \text{ V}$.

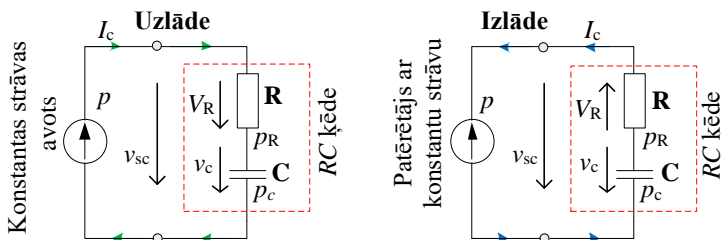


4.1. att. Superkondensatoru virknes slēguma ķēde.

Uzlāžu gadījumos SC slēgums no sākotnējā sprieguma $V_{C1} = 27 \text{ V}$ tiks uzlādēts līdz beigu spriegumam $V_{C2} = 54 \text{ V}$ laikā $t = 25 \text{ s}$. Savukārt sekojošo izlāžu gadījumos SC slēgums no sākotnējā sprieguma $V_{C1} = 54 \text{ V}$ tiks izlādēts līdz beigu spriegumam $V_{C2} = 27 \text{ V}$ tādā pašā laikā.

Uzlāde/izlāde ar konstantu strāvu

4.2. attēlā redzama SC ķēdei ekvivalentās RC ķēdes uzlāde un izlāde, kur konstantie parametri, piemēram, strāva I_C , apzīmēti ar lielajiem burtiem, mainīgie – ar mazajiem burtiem. Uzlādes gadījumā I_C plūst virzienā uz C, tāpēc potenciāli uz R un C ir vērsti vienādos virzienos, bet izlādes gadījumā I_C plūst virzienā projām no C, tāpēc potenciāli uz R un C ir ar pretējiem virzieniem. Spriegums v_C ir SC slēguma iekšējais jeb faktiskais spriegums, V_R – pretestības R dēļ izraisīts sprieguma kritums, kas ir konstants konstantas I_C dēļ.



4.2. att. SC slēguma uzlādes un izlādes elektrisko procesu attēlojumi ar ekvivalentu RC ķēdi.

SC ķēdes ārējais spriegums v_{SC} , kādu uzrāda voltmets uzlādes režīma laikā, ir šāds:

$$v_{SC} = v_C + V_R = v_C + I_C R. \quad (4.1.)$$

Izlādes režīma laikā voltmetra uzrādītajam SC slēguma spriegumam v_{SC} atbilst 4.2. ir –

$$v_{SC} = v_C - V_R = v_C - I_C R. \quad (4.2.)$$

No 4.1. un 4.2. formulas var secināt, ka uzlādes režīmā voltmetra uzrādītais spriegums v_{SC} ir augstāks par v_C , savukārt izlādes režīmā – zemāks, taču, līdz ko uzlāde vai izlāde beidzas, tā voltmets uzreiz uzrāda vērtību V_C . Konstantu strāvu, ar kādu jāuzlādē SC slēgums, lai tas noteiktā laikā t uzlādētos no sākotnējā sprieguma V_{C1} līdz beigu spriegumam V_{C2} , aprēķina šādi:

$$I_C = \frac{C(V_{C2} - V_{C1})}{t}. \quad (4.3.)$$

Ar 4.3. formulu aprēķina arī izlādes strāvu. Ja uzlāde un izlāde notiek vienādos laikos un sprieguma diapazonos, tad strāvas abos režīmos ir vienādas, tikai ar pretējiem plūšanas virzieniem. Izlādes procesa efektivitāte ir uzkrātās enerģijas E_{C1} un pilnās uz SC plūstošās enerģijas E_{SC1} dalījuma izteiksme. E_{SC1} sastāv no E_{C1} un no zaudētās enerģijas E_{R1} –

$$\eta_{uz} = \frac{E_{C1}}{E_{SC1}} = \frac{E_{C1}}{E_{C1} + E_{R1}} = \frac{C(V_{C2}^2 - V_{C1}^2)}{C(V_{C2}^2 - V_{C1}^2) + 2I_C^2 R t}. \quad (4.4.)$$

Izlādes procesā veiksmīgi izlādētā enerģija E_{SC2} atbilst pilnās izlādētās enerģijas E_{C2} un zaudētās enerģijas E_{R2} starpībai. Pilnā izlādes procesa efektivitāte ir E_{SC2} un E_{C2} dalījums –

$$\eta_{iz} = \frac{E_{SC2}}{E_{C2}} = \frac{E_{C2} - E_{R2}}{E_{C2}} = \frac{C(V_{C2}^2 - V_{C1}^2) - 2I_C^2 R t}{C(V_{C2}^2 - V_{C1}^2)}. \quad (4.5.)$$

Pilno uzlādes/izlādes procesa efektivitāti, kad uzlāde no V_{C1} līdz V_{C2} un pēc tam sekojošā izlāde no V_{C2} līdz V_{C1} notiek vienādos laikos, var aprēķināt kā izlādes režīma veiksmīgi izlādētās enerģijas E_{SC2} un uzlādes režīma pilnās uz SC novadītās enerģijas E_{SC1} dalījumu –

$$\eta_{uz/iz} = \frac{E_{SC2}}{E_{SC1}} = \frac{E_{C2} - E_{R2}}{E_{C1} + E_{R1}} = \frac{C(V_{C2}^2 - V_{C1}^2) - 2I_C^2 R t}{C(V_{C2}^2 - V_{C1}^2) + 2I_C^2 R t}. \quad (4.6.)$$

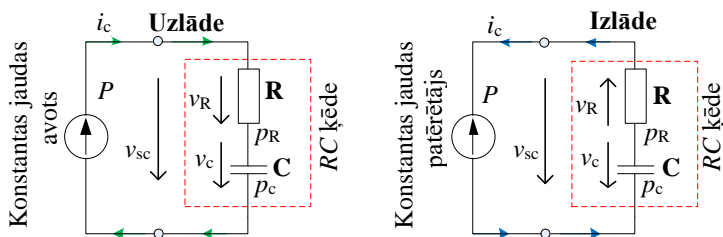
Uzlāde/izlāde ar konstantu jaudu SC ieejā

Uzlādes režīmā vienīgais konstantais parametrs ir SC ieejas jauda P , bet izlādes režīmā – veiksmīgi izlādētā jauda P , savukārt pārējie parametri – uzlādes/izlādes strāva i_C , sprieguma kritums v_R , iekšējais spriegums v_C – ir mainīgi lielumi, kas 4.3. attēlā apzīmēti ar maziem burtiem. Uzlādes gadījumā konstantā jauda P SC ieejā ir vienāda ar veiksmīgi uzkrātās jaudas p_C un jaudas zudumu p_R summu –

$$P = p_C + p_R = i_C v_C + i_C^2 R. \quad (4.7.)$$

Uzlādes procesa laikā starp strāvu i_C un kapacitāti C pastāv šāda sakarība:

$$v_C'(t) = \frac{i_C}{C}. \quad (4.8.)$$



4.3. att. SC slēguma uzlādes un izlādes elektrisko procesu attēlojumi ar ekvivalentu RC ķēdi.

Izmantojot 4.8. sakarību, lai pārveidotu 4.7. vienādojumu, iegūst:

$$RC^2 v_c'(t)^2 + C v_c v_c'(t) - P = 0. \quad (4.9.)$$

Izdalot 4.9. vienādojumu ar C , tek iegūts 4.10. kvadrātvienādojums, kura pareizā sakne ir 4.11. vienādojums.

$$RC v_c'(t)^2 + v_c v_c'(t) - \frac{P}{C} = 0, \quad (4.10.)$$

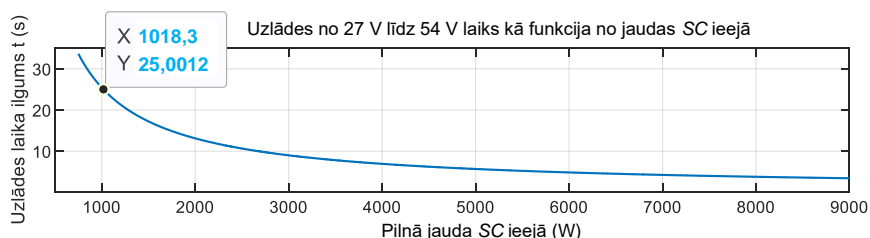
$$v_c'(t) = \frac{-v_c + \sqrt{v_c^2 + 4RP}}{2RC}. \quad (4.11.)$$

No 4.11. vienādojuma var izvest 4.12. diferenciālvienādojumu, kuru integrējot, var izvest uzlādes laika aprēķināšanas formulu (4.13. formula), ja v_c mainās no V_{C1} līdz V_{C2} laikā t .

$$dt = \frac{2RC}{-v_c + \sqrt{v_c^2 + 4RP}} dv_c, \quad (4.12.)$$

$$t = \frac{C}{4P} \left(V_{C2}^2 - V_{C1}^2 + V_{C2} \cdot \sqrt{4RP + V_{C2}^2} - V_{C1} \cdot \sqrt{4RP + V_{C1}^2} + 4RP \cdot \ln \left(\frac{V_{C2} + \sqrt{4RP + V_{C2}^2}}{V_{C1} + \sqrt{4RP + V_{C1}^2}} \right) \right). \quad (4.13.)$$

No 4.13. formulas nevar izvest konkrētu P aprēķināšanas formulu pie zināma laika t . P vērtību atrašanas variants ir 4.13. vienādojuma t atrisinājumus iegūt tabulas vai līknes veidā kā funkciju no P , kā redzams 4.4. attēlā, nodrošinot iespēju nolasīt interesējošam t atbilstošo P . Konkrētajā piemērā aprēķināti t pie P no 750 W līdz 9000 W ar soli 0,1 W, pie kura gan pastāv arī zināma t vērtības kļūda, kuras samazināšanai šim solim jābūt vēl mazākam. Piemēram, meklējot P pie laika $t = 25$ s, vistuvākā atrastā uzlādes laika vērtība, kas iegūta ar 4.13. formulu, ir aptuveni 25,0012 s, kā redzams 4.4. attēlā. Šī kļūda ir nenozīmīga, jo veido tikai tūkstošo daļu no sekundes, tāpēc turpmākiem aprēķiniem droši var izvēlēties atbilstošo $P = 1018,3$ W.



4.4. att. SC slēguma uzlādes laika diagramma atkarībā no padotās konstantās jaudas.

Izlādes gadījumā pie SC slēguma pieslēgts patērētājs patērē konstantu jaudu P , kas reāllaikā atbilst pilnās izlādētās jaudas p_C un zudumu jaudas p_R starpībai –

$$P = p_C - p_R = v_C i_C - i_C^2 R. \quad (4.14.)$$

Izlādes procesa laikā starp strāvu i_C un kapacitāti C pastāv šāda sakarība:

$$v'_C(t) = -\frac{i_C}{C}. \quad (4.15.)$$

Izmantojot 4.15. sakarību 4.14. vienādojuma pārveidošanai, tiek iegūst:

$$RC^2 v'_C(t)^2 + C v_C v'_C(t) + P = 0. \quad (4.16.)$$

Izdalot 4.16. vienādojumu ar RC^2 , tiek iegūts 4.17. kvadrātvienādojums ar pareizo atrisinājumu (4.18. vienādojums).

$$v'_C(t)^2 + \frac{v_C}{RC} v'_C(t) + \frac{P}{RC^2} = 0, \quad (4.17.)$$

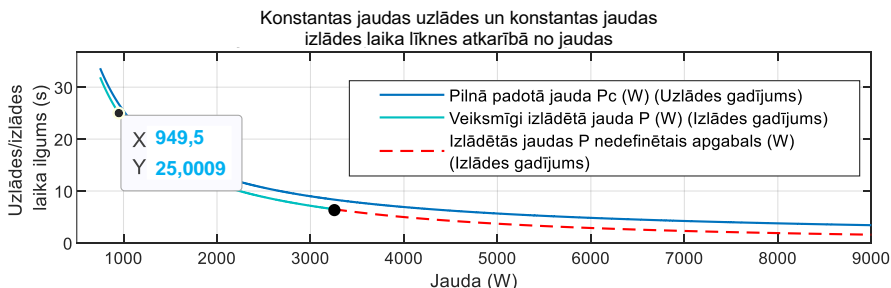
$$v'_C(t) = \frac{-v_C \pm \sqrt{v_C^2 - 4PR}}{2RC}. \quad (4.18.)$$

No 4.18. vienādojuma var izvest 4.19. diferenciālvienādojumu, kuru integrējot, var izvest izlādes laika aprēķināšanas formulu (4.20. formula), ja v_C mainās no V_{C2} līdz V_{C1} laikā t [30].

$$dt = \frac{2RC}{-v_C + \sqrt{v_C^2 - 4PR}} dv_C, \quad (4.19.)$$

$$t = \frac{C}{4P} \left(V_{C2}^2 - V_{C1}^2 + V_{C2} \cdot \sqrt{V_{C2}^2 - 4PR} - V_{C1} \cdot \sqrt{V_{C1}^2 - 4PR} - 4PR \cdot \ln \left(\frac{V_{C2} + \sqrt{V_{C2}^2 - 4PR}}{V_{C1} + \sqrt{V_{C1}^2 - 4PR}} \right) \right). \quad (4.20.)$$

Konkrētajā izlādes procesā vai nu laiks t , vai nu jauda P var būt vienāda ar attiecīgo uzlādes procesa parametru. Ja tiek nolemts, ka izlādes un uzlādes procesiem jānotiek vienādos laika ilgumos t , tad izlādes laikā patērētā jauda P ir mazāka par konstanto jaudu SC ieejā uzlādes procesā. Ja tiek nolemts, ka izlādes un uzlādes procesiem jānotiek ar vienādu konstantu jaudu P , tad izlāde notiek ātrāk. Pieņemot, ka uzlāde notiek no 27 V līdz 54 V, izlāde – no 54 V līdz 27 V, 4.5. attēlā vienā plaknē attēlotas uzlādes un izlādes procesu laiku salīdzināšanas līknes atkarībā no konstantas uzlādes/izlādes jaudas. Palielinoties jaudas vērtībai un samazinoties salīdzināmās uzlādes/izlādes laikam t , atšķirība starp uzlādes un izlādes ilgumiem palielinās.



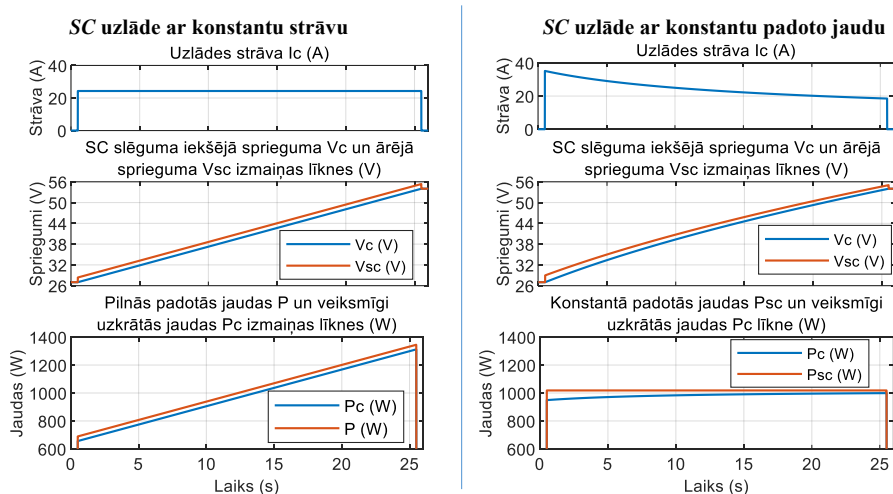
4.5. att. Uzlādes/izlādes laika diagrammas atkarībā no konstantās padotās/patērētās jaudas.

4.5. attēlā redzamā zaļā līkne vienā punktā (3254,5 W) kļūst par sarkano līkni, kas nozīmē, ka pie turpmākajām jaudām P 4.20. izteiksmē zemsaknes izteiksmes, kas iekļauj V_{C2} , vērtības iznāk negatīvas. Sarkanā pārtrauktā līkne atbilst 4.20. izteiksmes rezultātu komplekso skaitļu reālajām daļām, taču kopumā tas ir nedefinēts jaudas vērtību apgabals, ņemot vērā konkrētos izlādes nosacījumus, proti, ar šīm jaudām izlādēt SC slēgumu līdz prasītajam 27 V spriegumam nav iespējams. Uzlādes/izlādes procesa pilno efektivitāti aprēķina līdzīgi kā iepriekš – ar 4.4., 4.5. un 4.6. formulu. Konkrētajā situācijā veiksmīgi izlādēto enerģiju aprēķina šādi:

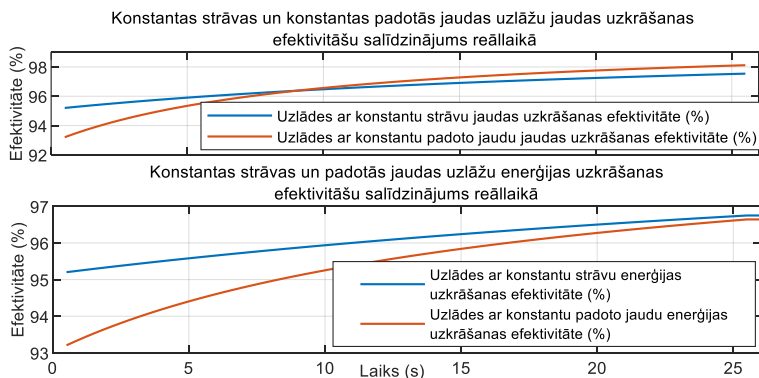
$$E_s = Pt. \quad (4.21.)$$

4.1. SC ķēdes konstantas strāvas un konstantas jaudas uzlādes/izlādes efektivitāšu savstarpējs salīdzinājums

4.6. attēlā redzami aplūkotā SC slēguma simulāciju rezultāti salīdzināšanai ar 25 s ilgām uzlādēm no 27 V līdz 54 V un izlādēm no 54 V līdz 27 V. 4.7. attēlā redzamas jaudas un enerģijas uzkrāšanas efektivitāšu izmaiņas reāllaikā.

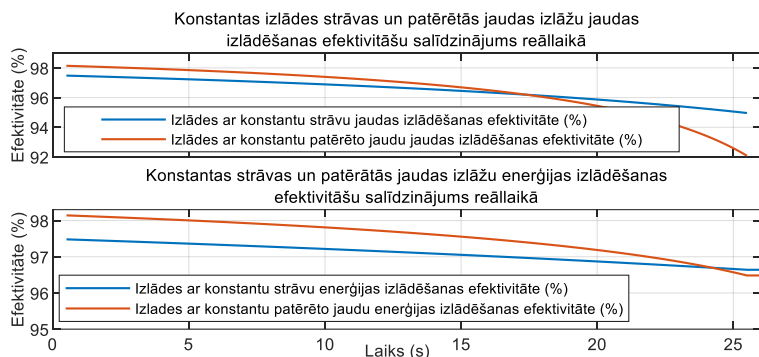


4.6. att. SC uzlāžu ar konstantu strāvu un konstantu jaudu simulāciju rezultātu līknes.



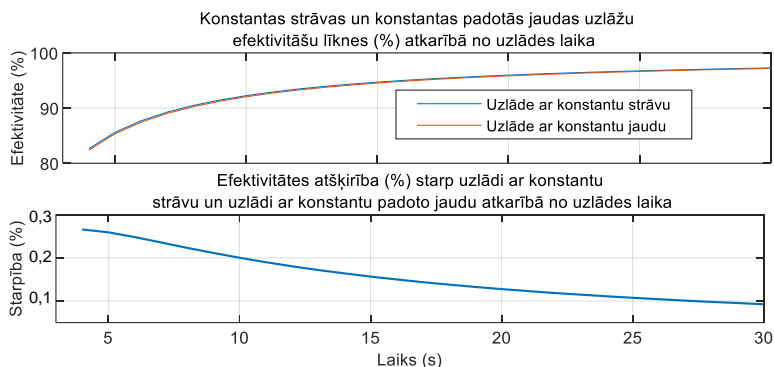
4.7. att. Jaudas un enerģijas uzkrāšanas efektivitāšu salīdzinājums reāllaikā.

Uzlādes procesa pilnājam enerģijas uzkrāšanas efektivitātei atbilst uzlādes beigu momentā esošā vērtība, un 4.7. attēlā redzams, ka konstantas uzlādes strāvas gadījumā šī vērtība ir augstāka, salīdzinot ar konstantas SC ieejas jaudas gadījumu. Arī konstantas izlādes strāvas gadījumā izlādes procesa efektivitāte ir augstāka, salīdzinot ar konstantas veiksmīgi izlādētās jaudas gadījumu, kā redzams 4.8. attēlā.



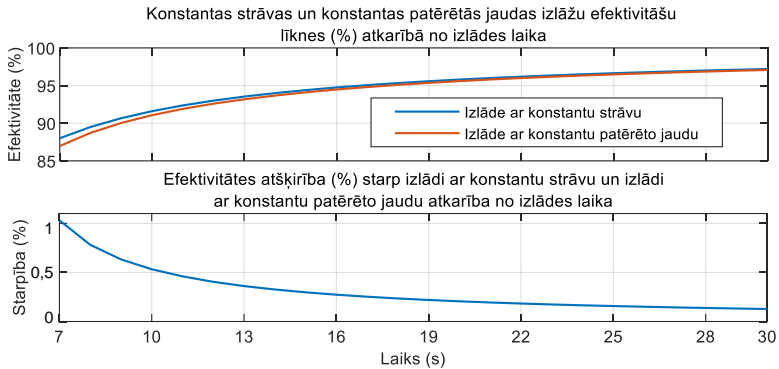
4.8. att. Jaudas un enerģijas izlādēšanas efektivitāšu salīdzinājums reāllaikā.

Tika nolemts aplūkot un salīdzināt 4 s līdz 30 s ilgus uzlādes un tikpat ilgus attiecīgas izlādes ar izmaiņas soli 1 s. Šo SC elementu maksimālā rekomendējamā pīķa strāva ir 240 A, tāpēc nav rekomendējamas 1–3 s uzlādes/izlādes. Lai arī ne izteikti, tomēr rezultāti (4.9. att.) uzrāda, ka uzlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi ar konstantu jaudu un procentuālās atšķirības veido aptuveni 0,1 % līdz 0,25 %. Ja uzlāde notiek ātrāk, procentuālā atšķirība ir lielāka, ja ilgāk – mazāka.



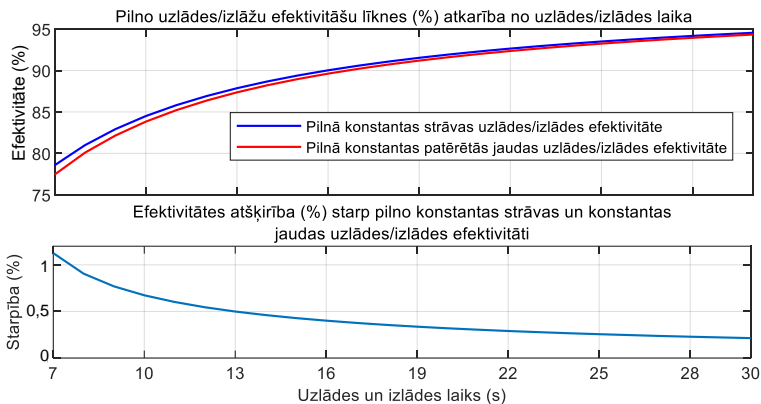
4.9. att. Uzlāžu efektivitātes salīdzinājums atkarībā no uzlādes laika.

Konstantas jaudas izlādes minimālais laiks ir 7 s, jo pie zemākām vērtībām 4.20. formulā zemsaknes izteiksmes ar V_{C2} ir negatīvas. Līdz ar to uzlādes laikiem, kas mazāki par 7 s, nepastāv definētas konstantas patērētās jaudas vērtības pēc iepriekš aprakstītā, atsaucoties uz 4.5. attēlu. Kā redzams 4.10. attēlā, izlāde ar konstantu strāvu ir manāmāk efektīva, salīdzinot ar uzlādes gadījumu, jo procentuālās atšķirības ir no aptuveni 0,15 % līdz 1 %.



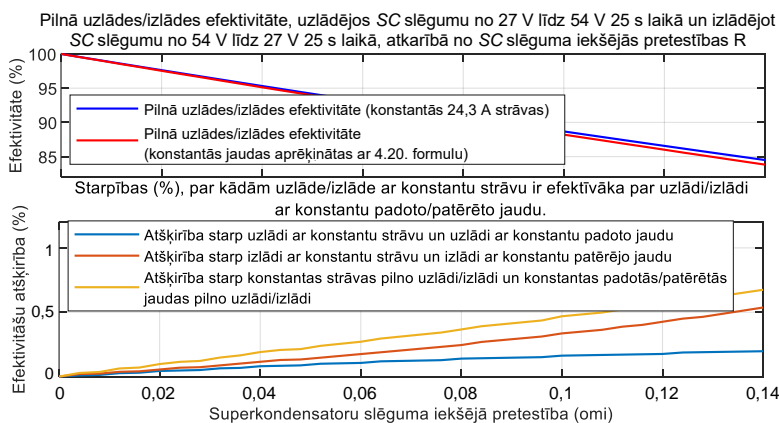
4.10. att. Izlāžu efektivitātes salīdzinājums atkarībā no izlādes laika.

4.11. attēlā redzams, ka konstantās strāvas pilnās uzlādes/izlādes efektivitāte ir augstāka par konstantās padotās/patērētās jaudas pilnās uzlādes/izlādes efektivitāti un procentuālā atšķirība veido 0,2 % līdz 1,1 %, būdama augstāka, ja uzlāde/izlāde ir ātrāka, un zemāka, ja uzlāde/izlāde ir ilgāka.



4.11. att. Pilno uzlādes/izlādes efektivitāšu salīdzinājums atkarībā no uzlādes un izlādes laika.

Tika pārbaudīts, kā mainās atšķirība, par kādu uzlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi ar konstantu SC ieejas jaudu, un kā mainās atšķirība, par kādu izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par izlādi ar konstantu patērēto jaudu atkarībā no SC slēguma iekšējās pretestības R , kas konkrētajiem SC elementiem pēc miljona pilnu uzlādes/izlādes ciklu var sasniegt aptuveni $0,14 \Omega$. Tāpēc tika veikts atšķirību salīdzinājums gadījumam, kad to pašu SC slēgumu uzlādē no 27 V līdz 54 V 25 s laikā pie dažādām R – no 0Ω līdz $0,14 \Omega$ ar soli $0,004 \Omega$. Saskaņā ar aprēķinu rezultātiem gan uzlāde, gan izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka jebkurā gadījumā, izņemot gadījumu, kad iekšējās pretestības nav, t. i., $R = 0 \Omega$, jo tad abām stratēģijām ir vienāda 100 % efektivitāte. Taču praksē šāds gadījums nav iespējams, jo kaut kāda iekšējā pretestība būs jebkuram kondensatoram. Saskaņā ar 4.12. attēlu pie mazākām R atšķirība starp uzlādes procesiem ir mazāka, savukārt pie lielākām R šī atšķirība pakāpeniski pieaug, savukārt izlādēšanas gadījumā minētās atšķirības ir izteiktākas.

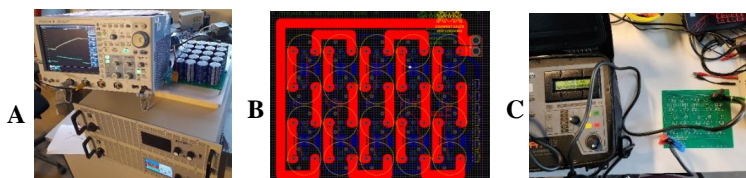


4.12. att. Uzlādes/izlādes metožu efektivitāšu salīdzinājums atkarībā no SC pretestības.

Pēc efektivitāšu atšķirībām secināms, ka uzlāde/izlāde ar konstantu strāvu ir nebūtiski efektīvāka par uzlādi ar konstantu padoto jaudu un izlādi ar konstantu patērēto jaudu, jo atšķirības ir krietni zem 1 %. Līdz ar to abas no šīm uzlādes/izlādes metodēm efektivitātes ziņā ir praktiski līdzvērtīgas. Tomēr veiktajiem aprēķiniem un iegūtajiem rezultātiem ir fundamentāla teorētiska vērtība, jo tie pierāda un pamato, ka attiecībā uz RC modeli efektivitātes ziņā kondensatora uzlāde ar konstantu strāvu nav identiska uzlādei ar konstantu SC ieejas jaudu un izlāde ar konstantu strāvu nav identiska izlādei ar konstantu patērēto jaudu.

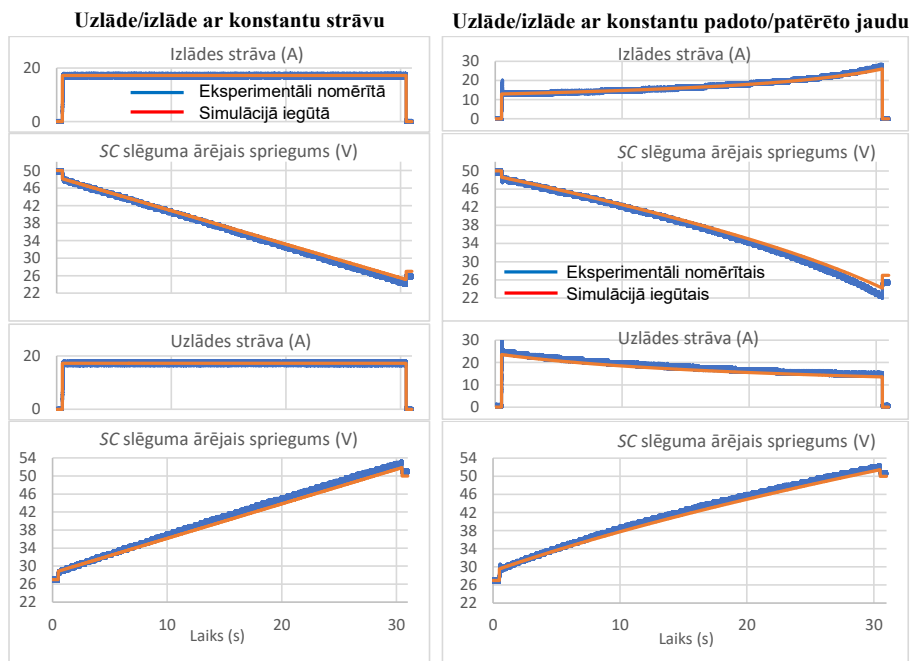
4.2. SC ķēdes eksperimentāla uzlādēšana/izlādēšana un mērījumu salīdzināšana ar simulāciju rezultātiem

Tika nolemts veikt arī reāla SC slēguma uzlādes/izlādes, lai pārbaudītu, vai iepriekš aprakstītais teorētiskais pamatojums par to, ka uzlāde/izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi/izlādi ar konstantu jaudu, ir pārbaudāms arī praktiski, ņemot vērā to, ka atklātā atšķirība ir pavisam neliela, proti, zem 1 %. 4.1. attēlā redzamais SC slēgums tika uzlādēts, izmantojot laboratorijas barošanas avotu, un izlādēts, izmantojot elektronisku slodzi. Slēguma sākotnējais spriegums bija $V_{C1} = 27$ V, beigu spriegums $V_{C2} = 50$ V. Uzlādes un izlādes laiks ilga 30 s. Eksperimentālie mērījumi tika veikti, izmantojot 4.13. attēlā redzamo stendu, un salīdzināti ar simulāciju rezultātiem. Veicot aprēķinus ar RC ķēdi, parametra R noteikšanā tomēr nevar paļauties tikai uz SC slēguma pilno iekšējo pretestību, jo diezgan ievērojama pretestība var būt arī slēguma plates vadošajiem celiņiem. Ar mikroometra palīdzību tika noskaidrots, ka to kopējā pretestība ir aptuveni 46 mΩ.

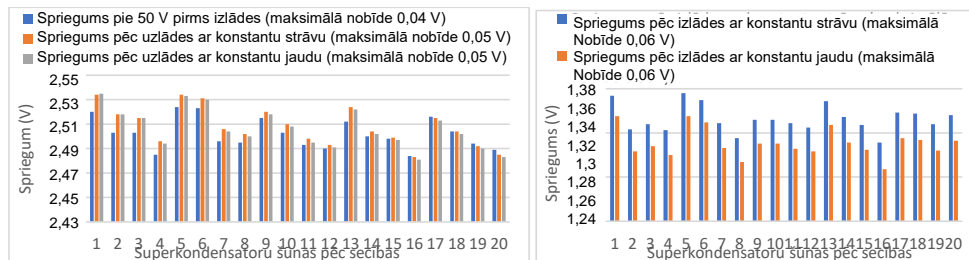


4.13. att. A – mērīšanas stends; B – plates vadošie celiņi; C – celiņu pretestības mērīšana.

Lai tiktu nodrošinātas 30 s izlādes un uzlādes, konstantā strāva ir $I_C = 17,25$ A (pēc 4.1. formulas) gan uzlādē, gan izlādē, konstantā uzlādes jauda SC ieejā ir 697,1 W (pēc 4.13. formulas), konstantā patērētā jauda izlādes gadījumā ir 630,6 W (pēc 4.20. formulas). 4.14. attēlā redzami mērījumu un simulāciju rezultāti, kuros tomēr var manīt nelielas atšķirības. Viens no neprecizitāšu iemesliem ir vienkāršotā RC modeļa izmantošana aprēķinos un simulācijās, otrs – SC slēguma kapacitāte C var atšķirties no aprēķinātās, jo C ar laiku samazinās, savukārt SC iekšējā pretestība R , kas ar laiku palielinās, var atšķirties no aprēķinātās. Turklāt atsevišķu SC elementu C un R laika gaitā var būt izmainījušies nevienmērīgi, jo sprieguma balansēšanas ķēdes var nenodrošināt vienādus spriegumus uz SC elementiem. Tāpēc pirms un pēc uzlādēm/izlādēm tika nomērīti spriegumi uz katra SC elementa, lai pārliecinātos, cik vienmērīgi pa tiem sadalīts slēguma spriegums. Tika atklātas zināmas spriegumu nobīdes, kā redzams 4.15. attēlā, kur redzama tāda kā nobīžu simetrija ik pa četriem secīgiem SC . Šajā situācijā maksimālās atšķirības ir no 0,04 V līdz 0,06 V.



4.14. att. SC slēguma izlādes/uzlādes mērījumu un simulāciju rezultātu salīdzināšanas līknes.



4.15. att. SC slēguma katras šūnas sprieguma vērtības.

5. SECINĀJUMI

Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta elektriskā sabiedriskā transporta infrastruktūra ir viens no lielākajiem elektriskās enerģijas patērētājiem, tāpēc ir aktuāli jautājumi par šīs infrastruktūras energoefektivitātes uzlabošanu, samazinot elektriskās enerģijas patēriņu. Elektriskā transporta vienību, piemēram, trolejbusu rekuperējošās piedziņas bremsēšanas režīma laikā rekuperē bremsēšanas enerģiju, kuras uzkrāšana SC EUS un izmantošana nākamā paātrinājuma laikā ir galvenais veids, kā samazināt pilno elektriskās enerģijas patēriņu. Šim mērķim ir nepieciešams plānot ekonomisku mobilo SC EUS, kas nav domāta garu autonomā režīma distanču nodrošināšanai, bet tikai rekuperētās enerģijas uzkrāšanai un izmantošanai, tomēr šādas EUS sākotnējai energoietilpībai jābūt par noteiktu rezerves apjomu augstākai par uzkrājamo rekuperēto enerģiju, jo SC energoietilpība to izmantošanas gaitā pakāpeniski samazinās. Ar SC EUS izmantošanas palīdzību tiek novērsti arī potenciālie pārvades zudumi, kas būtu aktuāli, ja jauda uz trolejbusa vilces piedziņu plūstu tikai no apakšstacijas, tāpēc ir nepieciešami instrumenti jeb trolejbusa kustības simulāciju datormodeļi, ar kuru palīdzību var pētīt, vai SC EUS izmantošana attiecīgā situācijā būtu efektīva, ņemot vērā ietaupītās enerģijas apjomu, kas iekļauj arī novērstos pārvades zudumus, kuru pētīšanai tika izstrādāti trīs varianti. Elektrisko parametru reāllaika aprēķināšanas metode prasa izvest kvadrātvienādojumus, jo, ņemot vērā konkrētos lielumus, ķēdei ir divi darbības varianti, tāpēc arī tiek iegūti divi atrisinājumi, no kuriem pareizais jāizspriež pēc loģiskiem apsvērumiem. Var izmantot arī rezistoru elementu ķēdi, kur simulācijas laikā tiek saslēgts pārvades pretestībai atbilstošs slēgums, tomēr šāds modelis var būt apjomīgs ar lielu rezistoru elementu skaitu un ilgāku izpildi. Tika secināts, ka aktīvai pretestībai ekvivalenta sprieguma avota elementa izmantošana ir visvieglāk realizējama un arī racionālāka vairāku vienā kontakttīkla posmā esošu trolejbusu simulācijām. Veicot simulācijas, apstiprinājās pirmā hipotēze, ka piedziņas enerģijas patēriņa pieaugums mobilas EUS masas dēļ ir zemāks par 5 %, savukārt apakšstacijas pilnais enerģijas patēriņš var samazināties par vairāk nekā 40 %. Trolejbusa paātrinājuma beigās ir augstākais jaudas patēriņš un attiecīgi augstākie pārvades zudumi, tāpēc ir rekomendējams, lai SC EUS spētu piedziņu apgādāt ar jaudu līdz paātrinājuma režīma beigām, tādējādi novēršot apakšstacijas jaudas pīķi. Kopumā labi plānotas mobilas SC EUS izmantošana atmaksājas, un izteiktāka EUS izmantošanas finansiālā atdeve vērojama pie augstākām elektroenerģijas cenām, nevis pie zemākām EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksām. Atsevišķās situācijās var būt nepieciešamība elektriskā transporta mobilo SC EUS uzlādēt no kontakttīkla, ko var panākt, piemēram, ar konstantu strāvu un konstantu jaudu SC ieejā. Veicot detalizētus aprēķinus, balstoties RC ķēdē, kas ir visplašāk lietotais reālu SC aizvietošanas modelis, tika apgāzta otrā hipotēze, noskaidrojot, ka SC uzlādēšana ar konstantu strāvu SC ieejā ir efektīvāka par uzlādēšanu ar konstantu jaudu SC ieejā pie vienādiem nosacījumiem, un tas pats attiecināms uz izlādēšanu. Minētā atšķirība ir atkarīga no SC iekšējās pretestības un parasti ir zemāka par 1 %, tāpēc, no vienas puses, abas metodes var uzskatīt par gandrīz līdzvērtīgām, taču veiktajam atklājumam, kas ir aktuāls jebkura mēroga SC EUS jeb RC slēgumam, ir fundamentāla vērtība un arī praktiska nozīme, jo SC izmantošanas ilgtermiņā konstantas strāvas metodes efektivitāte varētu būt izteiktāka.

6. LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] J. J. Mwambeleko, T. Kulworawanichpong, K. A. Greyson “Tram and trolleybus net traction energy consumption comparison”, 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2015, Pattaya, Thailand.
- [2] L. Hubka, P. Školnik “Tram Simulation Model for Energy Balance Analyses”, 21st International Conference on Process Control (PC) 2017, Slovakia.
- [3] M. Bartłomiejczyk, S. Mirchevski “Reducing of energy consumption in public transport – Results of experimental exploitation of super capacitor energy bank in Gdynia trolleybus system,” 16th International Power Electronics and Motion Control conference and Exposition (PEMC), 2014.
- [4] M. Bartłomiejczyk “Super capacitor energy bank MEDCOM UCER-01 in Gdynia trolleybus system,” 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016.
- [5] M. Bartłomiejczyk “Modern technologies in energy demand reducing of public transport – practical applications”, 2017.
- [6] D. Iannuzzi, P. Pighetti, P. Tricoli, “A study on Stationary Supercapacitor sets for Voltage Droops Compensation of Streetcar Feeder Lines,” Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, 2010.
- [7] L. Streit, P. Drabek “Simulation Model of Tram with Energy Storage System”, 2013.
- [8] L. Latkovskis, V. Brazis “Simulation of the Regenerative Energy Storage with Supercapacitors in Tatra T3A Type Trams”, 2008.
- [9] L. Latkovskis, V. Brazis, L. Grigans “Simulation of On-Board Supercapacitor Energy Storage System for Tatra T3A Type Tramcars”, Modelling Simulation and Optimization. G.Rey, L.Muneta red. Sciy: InTech, 2010.
- [10] U. Sirmelis, L. Grigans, L. Latkovskis “An analytic simulation model for a supercapacitor-based energy storage system”, Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011, Birmingham, UK.
- [11] F. Ciccarelli, A. Del Pizzo, D. Iannuzzi “Improvement of energy efficiency in light railway vehicles based on power management control of wayside lithium-ion capacitor storage”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 1, January 2014.
- [12] R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo “Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles”, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2008, Poznan, Poland.
- [13] H. Xia, H. Chen, Z. Yang, F. Lin, B. Wang “Optimal Energy Management, Location and Size for Stationary Energy Storage System in a Metro Line Based on Genetic Algorithm”, Energies 2015.
- [14] L. Grigāns “Rekuperētās elektriskās enerģijas izmantošana pilsētas elektrotransportā, pielietojot superkondensatorus”. Promocijas darba kopsavilkums, Rīga 2012.
- [15] L. Latkovskis, L. Grigans “Estimation of the untapped regenerative braking energy in urban electric transportation network”, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2008, Poznan, Poland.

- [16] L. Grigāns “Rekuperētās elektriskās enerģijas izmantošana pilsētas elektrotransportā, pielietojot superkondensatorus”. Promocijas darba kopsavilkums, Rīga 2012.
- [17] L. Grigans, L. Latkovskis “Estimation of the power and energy requirements for trackside energy storage systems”, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, Barcelona, Spain.
- [18] V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, L. Grigans “Traction drive load simulator”, The 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Latvia 2011.
- [19] P. Drabek, L. Streit “The energy storage system for public transport vehicles”, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, Barcelona, Spain.
- [20] J. F. Pedrayes, M. G. Melero, J. G. Norniella, M. F. Cabanas, G. A. Orcajo, and A. S. González, “Supercapacitors in Constant-Power Applications: Mathematical Analysis for the Calculation of Temperature”, *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, Art. no. 21, Jan. 2021.
- [21] A. Rufer, P. Barrade, “A supercapacitor-Based energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004.
- [22] M. B. Richardson, “Flywheel energy storage system for traction applications,” in *Proc. Int. Conf. Power Electron., Mach. Drives*, 2002, ISSN 0537-9989, pp. 275–279.
- [23] D. R. Kelsall, “Pulsed power provision by high speed composite flywheel,” in *Proc. Pulsed Power Inst. Elect. Eng. Symp.*. London, U. K., 0.5 3–4, 2000, INSPEC Acc. Nr. 6 623 246, pp. 16/1–16/5.
- [24] “SITRAS SES, Energy Storage System for 750 V DC Railway,” Siemens Transportation Systems, Public. Nr A19100-V300-B276 and B275.
- [25] R. Barrero, J. Van Mierlo, X. Tackoen “Energy Savings in Public Transport: Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2008.
- [26] R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo “Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network”, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, September 3–5, 2008, Harbin, China.
- [27] H. Hoimoja “Energy Efficiency Estimation and Energy Storage Calculation Methods for Urban Electric Transportation” Phd Thesis, Tallin University of Technology, Tallin, Estonia, 2009.
- [28] U. Sirmelis “Pilsētas elektrotransporta sistēmu modelēšana optimālu enerģijas uzkrājēju parametru izvēlei”, Promocijas darba kopsavilkums, RTU Izdevniecība, Rīga 2015.
- [29] Y. Wang, Z. Yang, and F. Li, “Optimization of Energy Management Strategy and Sizing in Hybrid Storage System for Tram”, *Energies*, vol. 11, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2018.
- [30] J. F. Pedrayes *et al.*, “Lambert W function based closed-form expressions of supercapacitor electrical variables in constant power applications”, *Energy*, vol. 218, p. 119364, Mar. 2021.



Ģirts Staņa dzimis 1989. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura (2013) un maģistra grādu (2014) elektrotehnikā. Kopš 2015. gada strādā RTU Industriālās elektronikas un elektrotehnikas (no 2024. gada 1. maija – Industriālās elektronikas, elektrotehnikas un enerģētikas) institūtā, sākotnēji ieņemot zinātniskā asistenta amatu, kopš 2022. gada – pētnieka amatu. Zinātniskās intereses saistītas ar elektriskā transporta energoefektivitāti un enerģijas uzkrājēju sistēmām.