

Ģirts Staņa

ELEKTROTRANSPORTA LĪDZSTRĀVAS GAISVADU LĪNIJU MODELĒŠANA MOBILO ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU OPTIMIZĒŠANAI

Promocijas darbs



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 darbs

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

Rīga 2024

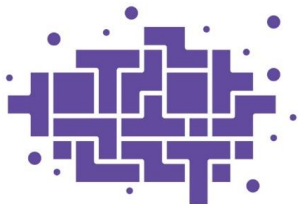
Staņa Ģ. Elektrotransporta līdzstrāvas gaisvadu līniju modelēšana mobilo enerģijas uzkrājēju optimizēšanai. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 145 lpp.

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



SATURS

IEVADS	5
1. ELEKTRISKĀ SABIEDRISKĀ TRANSPORTA KUSTĪBAS VIRTUĀLA MODELĒŠANA UN ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU SISTĒMU IZMANTOŠANAS PRIEKŠROCĪBAS	17
1.1. Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta elektriskā transporta pārvietošanās.....	17
1.2. Pilnā enerģijas patēriņa samazināšana ar EUS palīdzību.....	19
1.3. Rekuperētās enerģijas zudumu modelēšana.....	22
1.3.1. Elektriskā transporta rekuperētās enerģijas zudumi uzkrāšanas un atkārtotas izmantošanas procesos	22
1.3.2. Elektriskā transporta rekuperētās enerģijas zudumi, novadot uz citu paātrinājošo transportlīdzekli	24
1.4. Trolejbusa kustības matemātiskā modelēšana	24
1.5. Secinājumi.....	28
2. JAUNAS PIEEJAS ELEKTRISKĀ TRANSPORTA KONTAKTTĪKLA ELEKTROPĀRVADES ZUDUMU APRĒĶINĀŠANĀ UN SIMULĒŠANĀ	29
2.1. Kontakttīkla elektriskās pretestības aprēķināšana posmā starp apakšstaciju un elektrisko transportlīdzekli tā kustības laikā.....	29
2.1.1. Elektriskās pretestības aprēķināšanas formulas izvedums divvirzienu kontakttīkla posmam starp apakšstaciju un trolejbusu	31
2.2. Patērētāja sprieguma un strāvas matemātiska aprēķināšana pie zināmiem pārvades līnijas parametriem un patērētāja jaudas.....	35
2.2.1. Matemātisks aprēķins ar kvadrātvienādojumu izvedumu.....	36
2.2.2. Grafisks aprēķins	38
2.2.3. Variants ar kvadrātvienādojumu izvedumu, aprēķinot zudumu kompensēšanas strāvu.....	39
2.2.4. Aprēķins pie dažādām piedziņas jaudām un pārvades pretestībām	40
2.3. Elektropārvades zudumu modelēšanas varianti	44
2.3.1. Elektropārvades zudumu modelēšana ar elektrisko parametru matemātisku aprēķinu	45
2.3.2. Elektropārvades zudumu modelēšana ar rezistoru ķēdi saturošu apakšsistēmu	46
2.3.3. Pārvades zudumu simulāciju precizitāšu salīdzinājums modeļiem ar atšķirīgiem pretestības izmaiņas soļiem	48
2.3.4. Elektropārvades zudumu modelēšana ar sprieguma avota izmantošanu rezistoru apakšsistēmas vietā.....	50
2.4. Kontakttīkla elektriskās pretestības aprēķināšana divu trolejbusu kustības gadījumā.....	51
2.4.1. Strāvu plūsmas gaisvadu kontakttīklā divu trolejbusu kustības gadījumā un pārvades pretestības shēmas vienkāršošana.....	52
2.4.2. Gaisvadu kontakttīkla elektroapgādes ķēdes vienādojumi divu trolejbusu kustības gadījumā	55
2.4.3. Elektropārvades zudumu modelēšana ar sprieguma avotu elementu izmantošanu divu trolejbusu kustības gadījumā	57
2.4.4. Bremzējošā trolejbusa rekuperētās jaudas plūsmas simulēšana un rezultātu interpretēšana	59
2.5. Trolejbusa kontakttīkla gaisvadu temperatūras izmaiņas ietekme uz elektropārvades pretestību, zudumiem un apakšstacijas enerģijas patēriņu	60

2.6.	Līdzstrāvas elektropārvades līniju elektrisko parametru izmaiņu eksperimentāli mērījumi pie ilgstošām konstantām patērētāju jaudām.....	65
2.7.	Secinājumi.....	73
3.	EKONOMISKU MOBILU EUS MĒROGOŠANA REKUPERĒTĀS ENERĢIJAS EFEKTĪVAS IZMANTOŠANAS NODROŠINĀŠANAI.....	74
3.1.	Ar superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmu aprīkota trolejbusa kustības modelēšana.....	74
3.1.1.	Trolejbusa kustības un līdzsprieguma impulsu pārveidotāja darbības rezultātu simulēšana.....	75
3.2.	Rekuperētās enerģijas apjoma noskaidrošana.....	78
3.3.	Rekuperētās enerģijas uzkrāšanai paredzētas mobilas superkondensatoru EUS plānošana un aprēķināšana.....	80
3.4.	Rekuperētās enerģijas izmantošanas efektivitātes aprēķināšana ar vidējo strāvu metodi.....	84
3.4.1.	Mobilas superkondensatoru EUS uzlādes efektivitāte	86
3.4.2.	Mobilas superkondensatoru EUS izlādes efektivitāte	88
3.4.3.	Rekuperētās enerģijas izmantošanas efektivitātes atkarība no SC šūnu nolietojuma un no pielietoto iekārtu efektivitātes	90
3.5.	Mobilas superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas optimālas vadības stratēģijas un to efektivitāšu salīdzinājums.....	94
3.5.1.	Stratēģija ar apakšstacijas jaudas pīķa ierobežošanu.....	95
3.5.2.	Stratēģija ar konstantu izlādes proporcionalitāti.....	97
3.5.3.	Stratēģija ar konstantu izlādes proporcionalitāti un vēlāku izlādi	98
3.5.4.	Stratēģiju efektivitāšu salīdzinājums	99
3.6.	Transporta mobilās superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas masas ietekme uz kopējo elektroenerģijas patēriņu.....	100
3.7.	Mobilas un stacionāras superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas izmantošanas efektivitātes salīdzinājums.....	104
3.8.	Mobilas superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas izmantošanas rezultātā ietaupīto finansiālo līdzekļu aprēķins	106
3.8.1.	Superkondensatoru ekspluatācijas laikā veiksmīgi izmantotās trolejbusa rekuperētās enerģijas aptuvens aprēķins.....	107
3.8.2.	Superkondensatoru izmantošanas rezultātā prognozējamās nestās peļņas aprēķins.....	108
3.9.	Secinājumi.....	112
4.	SUPERKONDENSATORU KONSTANTAS JAUDAS UN KONSTANTAS STRĀVAS UZLĀDES/IZLĀDES METOŽU EFEKTIVITĀŠU SALĪDZINĀJUMS	113
4.1.	Izvirzītie nosacījumi superkondensatoru ķēdes uzlādēm/izlādēm	113
4.2.	SC ķēdes uzlādēšana/izlādēšana ar konstantu strāvu	114
4.3.	Ieskats SC ķēdes uzlādēšanā/izlādēšanā ar konstantu spriegumu.....	118
4.4.	SC ķēdes uzlādēšana/izlādēšana ar konstantu ieejas jaudu	119
4.5.	Ieskats SC ķēdes uzlādēšanā/izlādēšanā ar konstantu uzkrāto/izlādēto jaudu ...	126
4.6.	SC ķēdes konstantas strāvas un konstantas jaudas uzlādes/izlādes stratēģiju efektivitāšu savstarpējs salīdzinājums	128
4.7.	SC ķēdes eksperimentāla uzlādēšana/izlādēšana un mērījumu rezultātu salīdzināšana ar simulāciju rezultātiem.....	134
4.8.	Secinājumi.....	140
	SECINĀJUMI	141
	LITERATŪRAS SARAKSTS	143

IEVADS

Pētījumu tēmas aktualitāte

Parīzes nolīgums, kas stājās spēkā 2020. gadā un nosaka ilgtermiņa ceļu globālai cīņai ar cilvēka darbības izraisītajam klimata pārmaiņām, ietver ambiciozu mērķi, kas nosaka uzdevumus būtiski samazināt siltumnīcefektu izraisošo gāzu emisiju daudzumu un nodrošināt, lai globālā vidējā gaisa temperatūra nepaaugstinātos vairāk par 2 °C, salīdzinot ar pirmsindustriālā laikmeta vidējo gaisa temperatūru. Starptautiskā Enerģētikas Aģentūra ir izstrādājusi dažādus iespējamus CO₂ izmešu samazināšanās scenārijus, kuros transporta sektora elektrifikācijai ir ļoti nozīmīga loma, jo lai Parīzes nolīguma nosacījumi tiktu izpildīti, transporta sektoram ir vajadzīgi strikti regulējumi par radīto CO₂ emisiju apjoma samazināšanu [1]. Saskaņā ar [2], transporta sektora radīto CO₂ izmešu apjoms pasaulē sastāda aptuveni 23% no visiem ar enerģijas izmantošanu saistītajiem CO₂ izmešiem. Saskaņā ar [3], no visiem ar enerģijas izmantošanu saistītajiem CO₂ izmešiem transporta sektora radīto CO₂ izmešu apjoms Eiropā sastāda aptuveni 30%. Eiropas Savienības oficiālos infografiskos materiālos var manīt, ka 2016. gadā Eiropā pēc Eiropas Vides Aģentūras aprēķiniem no visa transporta sektora radītā CO₂ izmešu apjoma 72% rada autotransports, taču Eiropas Padomes Ģenerāls sekretariāta infografiskajā materiālā, kas datēts ar 2018. gadu, apgalvots, ka Eiropā pēc Eiropas Vides Aģentūras aprēķiniem no visa transporta sektora radīto CO₂ izmešu apjoma 94% rada autotransports [4]. Lai arī elektriskais transports pārvietošanās laikā neizdala CO₂ izmešus, tomēr elektrības, ar ko tiek uzlādētas elektrisko transportlīdzekļu baterijas vai ar ko tiek apgādātas pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgtu sabiedrisko elektrisko transportlīdzekļu vilces piedziņas, ražošanas procesā nereti tiek sadedzināti neatjaunojamie energoresursi, kā rezultātā izdalās CO₂. Taču līdzās transporta sektora elektrifikācijai un dekarbonizācijai notiek arī elektroapgādes sektora dekarbonizācija, t.i. elektrības ražošanā arvien vairāk tiek izmantoti atjaunojamie energoresursi.

Jebkuras attīstītas valsts galvaspilsētai un pārējām lielpilsētām sabiedriskā transporta infrastruktūra ir ļoti neatņemama sastāvdaļa, kas nodrošina iedzīvotāju, galvenokārt kā darbaspēka resursu, transportēšanu. Kopumā pārvietošanās ar sabiedrisko transportu pilsētās ir ekonomiskāka, salīdzinot ar privātu transportlīdzekļu lietošanu, jo braukšanas biļešu iegāde tomēr ir lētāka par privātu transportlīdzekļu izmantošanas kopējām izmaksām. Piedevām, pārvietošanās ar privātu transportlīdzekli pilsētās mēdz būt ļoti apgrūtināša sastrēgumu gadījumos. Savukārt uz pilsētu autoceļiem mēdz būt nozīmētas atsevišķas joslas, pa kurām, ja neskaita privātos elektromobiļus, atļauts pārvietoties tikai sabiedriskajam transportam, kas ievērojami paātrina tā pārvietošanās laiku. Toties pilsētu centros mēdz būt problēmas atrast stāvvietas privātu transportlīdzekļu novietošanai. Pēc iepriekš minētajiem apgalvojumiem ir saprotama pamatotība tam, kāpēc blīvi apdzīvotās pilsētās ir augsts pieprasījums pēc sabiedriskā transporta pakalpojumiem. Sabiedriskā transporta mērķis ir piedāvāt iedzīvotājiem augstas mobilitātes iespējas noteiktās pilsētas daļās, un līdzās pārvadāto pasažieru skaitam sabiedriskā transporta efektivitāti raksturo arī tā darbību nodrošinošo energoresursu ekonomiska izmantošana [5].

Ļoti būtisks elektriskā sabiedriskā transporta energoefektivitāti raksturojošs faktors ir iespēja bremsēšanas režīma laikā atgūt daļu no transportlīdzekļa kustības kinētiskās enerģijas reģenerētas elektriskās enerģijas veidā, ja vien attiecīgais transportlīdzeklis ir aprīkots ar rekuperējošu elektrisko piedziņu [6], [7], [8]. Elektriskā transporta aprīkošana ar akumulatoru un/vai superkondensatoru (SC) enerģijas uzkrājēju sistēmām (EUS) ir vispārzināms, bet salīdzinoši nesens reģenerētās enerģijas uzkrāšanas un atkārtotas izmantošanas nodrošinājuma variants, kas ticis pielietots apmēram pēdējās divas desmitgades [9]. Tomēr jautājumi par optimālu EUS izvēli un to vadības stratēģijām vienmēr ir bijuši un vēl arvien ir aktuāli [10]. Ir divi EUS lietošanas varianti - mobilas EUS, kas tiek uzmontētas uz transportlīdzekļa borta, un stacionāras EUS, kas tiek pieslēgtas pie kontakttīkla vai apakšstacijās. Katram no minētajiem variantiem ir savas priekšrocības un trūkumi. Mobilu EUS priekšrocība ir pastāvīga pieejamība, taču galvenais trūkums ir transportlīdzekļa masas pieaugums, līdz ar ko transportlīdzeklis ir spiests patērēt vairāk enerģijas kustības laikā. Turklāt mobilas EUS, piemēram, kontakttīkla bojājumu gadījumos transportlīdzeklim var nodrošināt arī autonomās gaitas kustības režīmus, kuru iespējamie ilgumi atkarīgi no EUS uzlādes stāvokļa. Stacionāru EUS priekšrocība ir raksturojama ar to, ka transportlīdzeklis papildus noslogots netiek, taču galvenais trūkums ir saistāms ar to, ka nozīmīgi enerģijas apjomi var tikt zaudēti pārvades laikā atkarībā no mainīga pārvades attāluma starp transportlīdzekli un EUS, un ar to, ka stacionāras EUS var būt nepieejamas, ja transportlīdzeklis un EUS atrodas atsevišķos un savstarpēji izolētos kontakttīkla posmos.

Elektriskie transportlīdzekļi tieši ieskrējiena laikā pieprasa visaugstākās jaudas nodrošinājumu un patērē visvairāk enerģijas. Tāpēc, pateicoties tam, ka trolejbusa reģenerētā enerģija, kas bremsēšanas laikā tikusi uzkrāta EUS, var tikt atkal izmantota ieskrējiena laikā, ir iespējams ne vien samazināt no apakšstacijām ņemtās enerģijas kopējo apjomu, bet arī nogludināt apakšstaciju jaudu pīķus. Tas paver iespējas apsvērt samazināt pieslēgumu rezervēto jaudu apjomus, jo, piemēram, Latvijā papildus elektroenerģijas patēriņam ir jāmaksā arī konstanta maksa par nodrošinātās jaudas pieslēgumu, t.i. jo augstāka jauda tiek nodrošināta, jo lielāka maksa par pieslēgumu un otrādi. Pieslēgumā pastāv arī zināma jaudas rezerve, jo ja vidējā patērētā jauda izteikti pārsniedz pilno rezervēto jaudu, ir jāmaksā soda procenti.

Pētāmie objekti

Trolejbuss ir videi draudzīgs, mūsdienīgs un perspektīvs bezizmešu elektrotransporta veids, kas nodrošina salīdzinoši zemu enerģijas patēriņu, kas ir mazāks, salīdzinot ar dīzeļdzinēja autobusa enerģijas patēriņu [11]. Trolejbusa kontakttīkls un tā barošanas infrastruktūra nepieciešamības gadījumā var nodrošināt arī citu ar kontaktstieņiem aprīkotu transportlīdzekļu uzlādi braukšanas un stāvēšanas laikā. Tomēr trolejbusa bezsliežu gaisvadu elektroapgādes sistēmai ir lielāka kontakttīkla pretestības ietekme uz energoefektivitāti, nekā sliežu transporta, piemēram, tramvaju elektroapgādes sistēmām, jo sliežu ceļam ir ievērojami mazāka pretestība, bet no otras puses trolejbusa līnijas izbūve ir lētāka par tramvaja līnijas izbūvi.

Izpētei tika izvēlēti Latvijas galvaspilsētā Rīgā plašāk izmantotie 18 m garie trolejbusi Škoda 27Tr. Pieņemts, ka trolejbuss var būt bez EUS, ar mobilu EUS vai ar stacionāru EUS. EUS sastāv no SC uzkrājēju elementiem, impulsu pārveidotāja, ventilācijas sistēmām un cita

funkcionēšanu nodrošina palīgaprīkojuma. Trolejbusos var būt arī dažāds skaits pasažieru, kas ietekmē tā enerģijas patēriņa apjomu kustības laikā. Neskaitot kontakttīkla bojājuma un bezstrāvas posmu šķērsošanas gadījumus, apakšstacija ir kā vienmēr pieejams primārs elektriskās enerģijas avots, kas trolejbusa vilces piedziņu ar enerģiju var apgādāt jebkurā laikā, bet EUS ir kā sekundārs elektriskās enerģijas avots, kas trolejbusa vilces piedziņu ar enerģiju var apgādāt tad, ja to pieļauj pietiekami augsts tās uzlādes stāvoklis.

Pētīšanas instrumenti

Darba gaitā *Matlab/Simulink* vidē tika izstrādāti trolejbusa kustības datormodeļi, ar kuru palīdzību var veikt virtuālas trolejbusa kustību datorsimulācijas. Tika izstrādāti modeļi, kas paredzēti tikai viena trolejbusa kustības simulēšanai, un arī modeļi, kas paredzēti vairāku trolejbusu kustības simulēšanai, ar dažādiem elektropārvades pretestības modelēšanas variantiem. Viens modelis veido samērā kompleksu sistēmu, kas ietver šādas apakšsistēmas;

- trolejbusa kustības simulēšanas apakšsistēma, kura ietver virtuālu elektriskā dzinēja elementu ar vadības bloku;
- trolejbusa kustībai pretēji darbojošos spēku aprēķina apakšsistēma, kuras signāli tiek novadīti uz dzinēja vārpstu, tādējādi simulējot berzes un gaisa pretestību;
- elektropārvades zudumu simulēšanas apakšsistēma, kas reāllaikā strādā saskaņā ar vienu no šādiem pārvades pretestības modelēšanas un zudumu simulēšanas variantiem: elektrisko parametru aprēķins; gaisvadu pretestības simulēšana ar rezistoru elementu ķēdi; gaisvadu pretestības simulēšana ar sprieguma avotu;
- EUS simulēšanas apakšsistēma, kas ietver enerģijas uzkrājēju elementus, pazeminoši-paaugstinošu impulsu pārveidotāju un vadības sistēmu.

Pirms pētnieciskā trolejbusu kustību modelēšanas darba sākšanas RTU un RP SIA Rīgas Satiksme sadarbības līguma ietvaros no RP SIA Rīgas Satiksme tika iegūti trolejbusu ražotāja Škoda materiāli ar tehniskajiem datiem par trolejbusiem 27Tr, kuros parādītas arī eksperimentāli iegūtas reālu trolejbusu kustības kinemātisko un elektrisko parametru raksturlīknes, kuras turpmāk tika izmantotas kā precizitātes salīdzināšanas etaloni, pēc kuriem modeļu izstrādes gaitā veikt attiecīgas izmaiņas ar mērķi panākt, lai simulāciju rezultāti būtu tuvu atbilstoši reālu situāciju gadījumiem. Ar virtuāliem *Matlab* modeļiem nosimulējot trolejbusa kustības pie tādiem pašiem nosacījumiem, kādi uzrādīti eksperimentālajās līknēs un ar tām salīdzinot simulāciju rezultātus, varēja secināt, ka trolejbusa kustības simulāciju rezultātu precizitāte atbilst vidēji ne mazāk par 95 %, salīdzinot ar reāla trolejbusa kustību. No tā var secināt, ka darbā izmantoto trolejbusu modeļu simulāciju rezultāti ir ļoti tuvi reālām situācijām. Turklāt darba galvenais mērķis nebija izstrādāt absolūti precīzu trolejbusa kustības virtuālu modeli, kura simulāciju rezultāti pilnība sakrīt ar konkrētā trolejbusa kustības reālu gadījumu. Dotā trolejbusa virtuālais modelis kalpoja par instrumentu, ar kura palīdzību sasniegt vēlāk pieminētos darba mērķus un uzdevumus un apstiprināt to izpildi, piemēram, par jaunu elektropārvades pretestības modelēšanas metožu izstrādi un mobilu SC EUS plānošanas metodes izstrādi. Izmainot dotā datormodeļa parametrus, ir iespējams simulēt arī jebkura cita trolejbusa kustību, kas nozīmē, ka modelis ir izmantojams arī dažādiem citiem mērķiem.

Praktisku līdzstrāvas līnijas silšanas un sprieguma krituma pieauguma mērīšanas eksperimentu veikšanai tika izmantots maiņstrāvas elektriskās piedziņas stends un līdzstrāvas elektropārvades līnija.

SC slēguma konstantas strāvas un konstantas jaudas uzlādes/izlādes efektivitāšu salīdzināšanai tika izmantots gan virtuāls datormodelis uz RC (rezistora R un kondensatora C virknes slēgums) slēguma bāzes, gan arī reāls SC elementu slēgums, veicot tā uzlādi no sprieguma avota un izlādi ar elektronisku slodzi.

Pētīšanas metodes

Elektriskais transports kā pētāmā sistēma ir kustīga un dinamiska, kuras stāvoklis laikā mainās atkarībā no daudziem parametriem. Mainīga kontakttīkla elektropārvades pretestība, mainīga transportlīdzekļa masa un arī iekšējie zudumi apakšstacijās, piedziņas inverteros un EUS impulsu pārveidotājos ir uzskatāmi par nozīmīgiem un reģistrējamiem sistēmas ieejas parametriem, kas visi kopā atstāj nozīmīgu ietekmi uz pētījumu rezultātiem. Tāpēc šajā darbā mobilo EUS gadījumā analizēts trolejbusu elektriskās enerģijas patēriņa pieaugums, kas radies uz EUS papildus masu rēķina. Stacionāru EUS gadījumā pētīti enerģijas apjomi, kas tiek zaudēti kontakttīklā elektropārvades zudumu veidā. Līdzās kontakttīkla elektropārvades zudumiem ņemti vērā arī enerģijas zudumi trolejbusa vilces piedziņas inverterā, EUS impulsu pārveidotājos, iekšējie zudumi SC un arī vilces apakšstacijās.

Tika veikti līdzstrāvas līnijas silšanas un sprieguma krituma pieauguma mērīšanas praktiskie eksperimenti, izmantojot maiņstrāvas elektriskās piedziņas stendu un elektropārvades līniju, kura savieno barošanas avotu jeb 600 V līdzstrāvas tīklu un patērētāju. Patērētājs jeb maiņstrāvas dzinējs tika ilgstoši darbināts ar dažādām konstantām jaudām pie dažādiem 200m līdz 400m elektropārvades līnijas garumiem.

Tika veikti konstantas strāvas un konstantas jaudas SC uzlādes/izlādes eksperimenti, izmantojot virtuālu datormodeli uz RC slēguma bāzes un izmantojot reālu SC slēguma ķēdi.

Izvirzītie nosacījumi attiecībā uz superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmām

Galvenais darbā aplūkoto EUS lietošanas mērķis ir elektriskā transporta reģenerētās enerģijas uzkrāšana un izmantošana, nevis garu autonomā režīma distanču nodrošināšana. Šāda veida EUS ir uzskatāmas kā ekonomisks neliela budžeta risinājums. SC , kas, būdami ar augstu jaudas blīvumu, var tikt salīdzinoši strauji uzlādēti un izlādēti, tika izvēlēti kā EUS elementi. Tātad, no vienas puses, priekš attiecīga veida trolejbusa mobilo EUS var uzskatīt par optimālu, ja tās izvēlēta energoietilpība par trolejbusa reģenerētās enerģijas apjomu nav ne zemāka, lai atlikušo enerģiju nenāktos novadīt uz bremžu rezistoru, ne arī būtiski augstāka, lai nerastos priekšstats, ka trolejbuss ir ar lieku aprīkojumu. Tomēr, no otras puses, ir vēlama zināma energoietilpības rezerve, jo ekspluatācijas laikā EUS efektivitāte, t.i. – energoietilpība samazinās sakarā ar tās elektrisko parametru degradēšanos novecošanās dēļ. Mobila EUS var uzkrāt arī citu pa to pašu kontakttīkla sekciju pārvietojamos trolejbusu reģenerēto enerģiju, bet promocijas darbā pieņemts, ka netiek veikta bremzēšanas enerģijas pārdale starp trolejbusu EUS. Stacionāru EUS ietilpību ieteicams izvēlēties tādu, lai būtu iespējams akumulēt maksimāla vienā posmā esošu trolejbusu skaita vidējo kopējo reģenerēto enerģiju.

Darbā pētītas optimālu EUS vadības metožu stratēģijas, kurās trolejbusa piedziņu ar enerģiju apgādā gan apakšstacija, gan EUS un kuras tikušas analizētas saskaņā ar rezultātiem. Izteikti priekšlikumi par optimālām mobilu EUS vadību stratēģijām:

- Stratēģija ar apakšstacijas jaudas pīķa ierobežošanu;
- Stratēģija ar konstantu izlādes proporcionalitāti;
- Stratēģija ar konstantu izlādes proporcionalitāti un vēlāku izlādes uzsākšanu.

Darbā veikts arī mobilu EUS un stacionāru EUS darbības efektivitātes salīdzinājums, ņemot vērā papildus noslodzi trolejbusam mobilu EUS gadījumā un elektropārvades zudumus stacionāru EUS gadījumā.

Tomēr trolejbusa reģenerētā enerģija var tikt izmantota arī bez pieejamas EUS, ja tajā pašā kontakttīkla posmā atrodas otrs ātrumu uzņemošs trolejbuss. Taču tas, cik lielu daļu no šīs enerģijas absorbēs otrs trolejbuss, ir atkarīgs no tādiem faktoriem, kā savstarpējā attāluma starp trolejbusiem, un arī no tā, kādu enerģijas apjomu pieprasa ātrumu uzņemošais trolejbuss konkrētā momentā. Tāpēc promocijas darba gaitā tika izstrādāti arī *Matlab/Simulink* modeļi, ar kuriem var simulēt vairāku trolejbusu kustību un to savstarpēju bremzēšanas enerģijas apmaiņu.

Darba mērķi un uzdevumi

- 1) Izstrādāt uzlabotas pārvades zudumu modelēšanas metodes pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta sabiedriskā elektriskā transporta – trolejbusa – kustības simulācijām.
- 2) Ar simulāciju palīdzību izpētīt EUS impulsu pārveidotāja un trolejbusa vilces piedziņas invertora lietderības koeficientu ietekmi uz rekuperētās enerģijas uzkrāšanu EUS un izmantošanu trolejbusa nākamajā ieskrējienā.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Izstrādāt metodi, kā tuvināti aprēķināt SC EUS darbmūža laikā ietaupīto apakšstacijas enerģijas apjomu un tā finansiālo vērtību, ko var salīdzināt ar SC EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksām, lai analizētu SC EUS atdevi.
- 6) Izstrādāt un salīdzināt mobilu SC EUS izlādes vadības stratēģijas, kuru mērķis ir panākt, lai kopā ar apakšstaciju EUS spētu apgādāt piedziņu ar enerģiju līdz paātrināšanās beigām, novēršot apakšstacijas jaudas pīķi, kas var rasties, ja EUS izlādējas pirms paātrināšanās beigām.
- 7) Ar simulāciju palīdzību veikt mobilu un stacionāru SC EUS efektivitāšu salīdzinājumu.

Promocijas darba hipotēzes

- 1) Mobilas SC EUS papildu masas dēļ 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 pretestību 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 energoietilpībai jābūt lielākam par maksimālās rekuverētās enerģijas apjomu, lai visā EUS ekspluatācijas laikā rekuverētā 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 ir maznozīmīgs, salīdzinot ar veiksmīgi uzkrāto un izmantoto rekuverēto enerģiju.
- 6) Izstrādātas un salīdzinātas mobilu 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, lai novērstu apakšstacijas jaudas pīķi: stratēģija ar sākotnēji aizrūtu izlādi; stratēģija ar noteiktu EUS izlādes intensitāti; jaudas pīķu apciršanas stratēģija ar apakšstacijas nodrošinātās jaudas ierobežošanu.
- 7) Izstrādāta metode, kā tuvināti aprēķināt apakšstacijas ietaupītās enerģijas cenu visa EUS darbmūža laikā, un noskaidrots, ka izteiktāka EUS atdeve vērojama nevis pie zemākām EUS pirkšanas 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 tika izklāstīti 32 (trīsdesmit divos) publicētos darbos, tajā skaitā trīs - zinātnisko žurnālu rakstos, viens - kolektīvā monogrāfijā un 28 konferenču publikācijās, kas tika prezentētas 26 zinātniskās konferencēs šādās valstīs: Latvijā (9), Igaunijā (5), Krievijā (4), Rumānijā (3), Čehijā (2), Turcijā (1), Bulgārijā (1), Lietuvā (1).

Zemāk uzskaitītas 23 konferenču publikācijas, kas indeksētas SCOPUS datubāzē, ar attiecīgajām konferencēm un to norises vietām:

- 1) Ģ. Staņa, K. Kroičs, V. Bražis, D. Ardanuov, "Efficiency Comparison of Discharge Strategies of Mobile Supercapacitor Energy Storage System for Public Electric Transport," 16.11.2023.-18.11.2023. International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE 2023), Bukareste, **Rumānija**
- 2) Ģ. Staņa, V. Bražis, "Theoretical and Practical Study of the Effect of DC Grid Wire Temperature Variation on Transmission Losses," 16.11.2023.-18.11.2023. International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE 2023), Bukareste, **Rumānija**
- 3) Ģ. Staņa, K. Kroičs, V. Bražis, "Method for Estimating the Efficiency of Energy Recycling for Electric Transport Equipped with Mobile Supercapacitor Storage System," 09.10.2023.-10.10.2023, 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2023), Rīga, **Latvija**
- 4) Ģ. Staņa, K. Kroičs, "Supercapacitor energy storage system discharge strategies considering discharge power levels and DC grid voltage drop," 14th National Conference with International Participation "Electronica 2023", Sofija, **Bulgārija**
- 5) Ģ. Staņa, K. Kroičs, "Efficiency Analysis and Calculation of Supercapacitor Constant Current and Constant Power Discharging Strategies," 10.10.2022.-12.10.2022, 63rd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2022), Rīga, **Latvija**
- 6) Ģ. Staņa, V. Bražis, J. Voitkāns, "Methods for Simulating Power Transmission Losses in Overhead Contact Line for Electric Transport Using Virtual Resistors and Voltage Sources" 10.10.2022.-12.10.2022, 63rd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2022), Rīga, **Latvija**
- 7) Ģ. Staņa, K. Kroičs, "Analysis and Comparison of Supercapacitor Constant Current, Voltage and Power Charging Strategies for Power Backup Applications," 25.09.2022.-28.09.2022, 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC 2022), Brašova, **Rumānija**
- 8) Ģ. Staņa, J. Voitkāns, V. Bražis, "Methods for Calculating Expected Voltage Drops of Prospective Power Transmission Systems," 15.11.2021.-17.11.2021, 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2021), Rīga, **Latvija**
- 9) Ģ. Staņa, V. Bražis, "Predicting the Financial Yield of Mobile Energy Storage Systems for Electric Public Transport," 14.10.2021.-15.10.2021, 62nd International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS 2021), Rīga, **Latvija**
- 10) Ģ. Staņa, V. Bražis, "Two Trolleybus Motion Modeling by Calculating Transmission Loss Compensation Currents," 15.10.2020.-16.10.2020, 61st International Scientific

- Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS 2020), Rīga, **Latvija**
- 11) Ģ. Staņa, V. Bražis, “Overhead DC Line Transmission Loss Calculation Algorithm in Motion Simulations of Electric Transport Equipped with Energy Storage System,” 27.01.2020.-30.01.2020, 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED 2020), Maskava, **Krievija**
 - 12) Ģ. Staņa, . Bražis, “Simulation-Based Research of Mobile Energy Storage System Mass Influence on Trolleybus Traction Drive and Supply Substation Energy Consumption,” 28.11.2019.-30.11.2019, 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2019), Bursa, **Turcija**
 - 13) Ģ. Staņa, V. Bražis, “Precision Comparison of Various Overhead DC Grid Transmission Resistance Changing Steps in Electric Transport Motion Simulations,” 15.11.2019.-16.11.2019, The 7th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE’2019), Liepāja, **Latvija**
 - 14) Ģ. Staņa, V. Bražis, “Calculation and Modeling of Compensating the Power Lost due to Transmission Resistance of Overhead DC Network for Electric Transport,” 02.09.2019.-06.09.2019, 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bukareste, **Rumānija**
 - 15) Ģ. Staņa, V. Bražis, “Analysis of Trolleybus Recuperation Energy Utilization Losses Considering Different Efficiency Ratios of Traction Inverter and DC/DC Converter,” 15.05.2019.-17.05.2019, 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, **Čehija**
 - 16) Ģ. Staņa, V. Bražis, “Electric Transport Braking Energy Storage System Sizing by Considering Aging-Related Degradation During Lifetime,” 30.01.2019.-02.02.2019, 26th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of electric Drives (IWED 2019), Maskava, **Krievija**
 - 17) Ģ. Staņa, V. Bražis, “Comparative Modeling of Mobile Energy Storage System Application for Trolleybuses,” 12.11.2018.-14.11.2018, 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Rīga, **Latvija**
 - 18) Ģ. Staņa, V. Bražis, “Energy Consumption Comparison of Standard and Articulated Trolleybuses: Case Study,” 03.10.2018.-06.10.2018, 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS 2018), Novočerkaska, **Krievija**
 - 19) Ģ. Staņa, V. Bražis, M. Priedītis, “Simulation-Based Comparisons of Mobile and Stationary Energy Storage Systems Applied for electric Transport,” 17.09.2018.-21.09.2018, 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’18 ECCE Europe), Rīga, **Latvija**
 - 20) Ģ. Staņa, V. Bražis, “Modeling of Two-Trolleybus Motion with Braking Energy Exchange and Transmission Resistance,” 31.01.2018.-02.02.2018, 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED 2018), Maskava, **Krievija**

- 21) Ģ. Staņa, V. Bražis, "Trolleybus with ESS Motion Simulation Considering Common Mass Increase and Transmission Losses," 12.10.2017.-13.10.2017, 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Rīga, **Latvija**
- 22) Ģ. Staņa, V. Bražis, "Trolleybus Motion Simulation by Dealing with Overhead DC Network Energy Transmission Losses," 17.05.2017.-19.05.2017, 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, **Čehija**
- 23) Ģ. Staņa, V. Bražis, P. Apse-Apsītis, "Virtual Energy Simulation of Induction Traction Drive Test Bench," 28.11.2014.-29.11.2014, 2nd Joint IEEE Lithuania and Latvia Sections Workshop on Advances in Information, electronic and Electrical Engineering AIEEE'14, Viļņa, **Lietuva**

Zemāk uzskaitītas 5 konferenču publikācijas, kas nav indeksētas SCOPUS datubāzē:

- 1) Ģ. Staņa, V. Bražis, "Mathematical Calculation and Experimental Measurement of DC Line Transmission Losses," 15.06.2022.-18.06.2022, 21st International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology III", Pērnavā, **Igaunija**
- 2) Ģ. Staņa, "Electric Transport Electrical Braking Energy Accumulation Efficiency of Supercapacitor Storage System Considering Aging-Related Deterioration," 14.01.2019.-19.01.2019, 18th International Symposium „Topical Problems in the Field on Electrical and Power Engineering” and „Doctoral School of Energy and Geotechnology III”, Toila, **Igaunija**
- 3) Ģ. Staņa, V. Bražis, "A Concept of Trolleybus Modeling for Energy Consumption Reduction Planning," 14.01.2018.-19.01.2018, 17th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and „Doctoral School of Energy and Geotechnology II”, Kuresāre, **Igaunija**
- 4) Ģ. Staņa, V. Bražis, "DC Power Line Loss simulation Method by Using Variable Resistor in Matlab Environment," 14.01.2017.-19.01.2017, 16th International Symposium „Topical Problems in the Field of electrical and Power Engineering” and „Doctoral School of energy and Geotechnology I”, Pērnavā, **Igaunija**
- 5) Ģ. Staņa, P. Apse-Apsītis, "An Insight into the Evolution of Direct Current Systems," 15th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and „Doctoral School of Energy and Geotechnology II”, 14.01.2015.-19.01.2015, Pērnavā, **Igaunija**

Zemāk uzskaitīti 2 zinātnisko žurnālu raksti, kas indeksēti SCOPUS datubāzē:

- 1) Ģ. Staņa, J. Voitkāns, K. Kroičs, "Supercapacitor Constant-Current and Constant-Power Charging and Discharging Comparison under Equal Boundary Conditions for DC Microgrid Application", MDPI, Energies, 2023, Vol.16, No. 10, doi: 10.3390/en16104167

- 2) K. Kroičs, Ģ. Staņa, "Bidirectional Interleaved DC-DC Converter for Supercapacitor Energy Storage Integration with Reduced Capacitance," MDPI, Electronics, 2023, Vol.12, No. 1, doi: 10.3390/electronics12010126

Zinātniskā žurnāla raksts, kas nav indeksēts SCOPUS, bet ir indeksēts WEB OF SCIENCE:

- 1) Ģ. Staņa, V. Bražis, P. Apse-Apsītis, "Simulation of Induction Traction Drive with Supercapacitor Energy Storage System Test Bench," Electrical, Control and Communication Engineering, 2015, Vol.9, No.1, doi: 10.1515/ecce-2015-0007

Kolektīva monogrāfija, kas paredzēta lietošanai augstākās izglītības iestādēs:

- 1) „Mathematical Modelling of Mechatronic Systems”, RTU Izdevniecība, 2021

Līdzšinējie pētījumi

Veicot pētījumus par sabiedrisko elektrisko transportlīdzekļu, piemēram, tramvaju un 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 [12], [13]. Par EUS lietošanu sabiedriskajos elektriskajos transportlīdzekļos līdz šim ir veikti gan pētījumi, kuru ietvaros tikuši veikti praktiski eksperimenti ar reāliem transportlīdzekļiem un EUS [14],[15],[16],[17], gan pētījumi, kuru ietvaros nav tikuši izmantoti reāli transportlīdzekļi un EUS, bet gan virtuāli elektrisko transportlīdzekļu un EUS datormodeļi [18], [19]. Elektriskā transporta un tā EUS darbības modelēšanu var veikt dažādās virtuālās vidēs, piemēram, *PSIM* [20], [21] un *Matlab Simulink* [22], [23]. Tomēr līdz šim veiktajos datorsimulācijās balstītajos teorētiskajos pētījumos par EUS lietošanu elektriskajam transportam var atrast vairākus turpmāk pieminētos trūkumus un vājās vietas, kas tikušas aplūkotas šajā darbā.

Piemēram, transportlīdzekļa masas pieaugumi, kas radušies uz papildus EUS rēķina, nav ņemti vērā. Tātad, nav veikti pētījumi par to, cik enerģijas elektriskais transportlīdzeklis spiests patērēt vairāk uz papildu EUS masas rēķina un vai šī 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 [24], [25]. Ir izstrādāti arī modeļi, kuros elektropārvades pretestība mainās ik pa sekcijām [43]. Pie 400-500 m nobrauktā attāluma kontakttīkla pretestība ievērojami mainās. 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 ņemti vērā, lietojot rezistoru elementus, kas imitē noteiktu pretestību jeb zudumus apakšstacijas transformatorā un taisngriezī, tomēr nereti nav ņemti vērā iekšējie zudumi piedziņas invertoros un EUS impulsu pārveidotājos.

Atsevišķos pētījumos, izmantojot reālus eksperimentāli iegūtus datus par elektriskā transporta patērēto un reģenerēto jaudu, tikušas prezentētas metodes, kā veikt elektriskā

transporta neizmantotās reģenerētās enerģijas aplēses aprēķinus ar varbūtisku un statistisku metožu palīdzību [26], [27]. Reģenerētās enerģijas atgūšanas efektivitāte ir atkarīga no EUS pieļaujamās jaudas un energoietilpības. Līdz ar to iespējams veikt konkrētu EUS atmaksas periodu aprēķinus un izmantoto rekuperēto enerģiju aprēķinus konkrētu EUS darbmūžu laikā. Taču autori atzinuši, ka precīzākiem atgūstamās enerģijas aprēķiniem būtu jāņem vērā arī zudumi kontakttīkla vados un EUS [28].

Ja nav pieejas jeb iespējas izmantot reālus sabiedriskos 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 imitē transportlīdzekļa slodzi [29], [30], [31], [32]. Tomēr parasti šādiem stadiem jaudu mērogi ir krietni mazāki par reālu transportlīdzekļu jaudām, tāpēc eksperimentu rezultātus, kas veikti uz stadiem, nevar uzskatīt par pilnīgi precīziem attiecībā uz reāliem transportlīdzekļiem, pat ja tiek ievērota proporcionalitāte.

Līdz šim nav veikti pētījumi par to, kā mainās EUS efektivitāte tās kalpošanas laikā, kas izpaužas ar elektrisko parametru degradēšanos jeb pasliktināšanos. Visefektīvāk SC iekārta strādā tad, kad tā ir pilnīgi 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 darbmūža laikā šī novecošanās var būtiski ietekmēt reģenerētās bremzēšanas enerģijas akumulēšanas efektivitāti, piemēram, kādā brīdī pirms ražotāju noteiktā kalpošanas laika EUS energoietilpība var būt samazinājusies līdz tādai pakāpei, ka EUS vairs nespēj uzņemt visu elektriskā transportlīdzekļa reģenerēto enerģiju. Tāpēc šajā darbā izklāstīts, ka objektīvāku ilgtermiņa EUS rentabilitātes un atmaksas aprēķinu rezultātu iegūšanai ir jāņem vērā arī novecošanās ietekme.

Elektriskā transporta mobilas EUS atsevišķos gadījumos var tikt uzlādētas arī no kontakttīkla, un galvenās uzlādes metodes ir uzlāde ar konstantu strāvu un uzlāde ar konstantu jaudu. Ir veikti teorētiski pētījumi par SC slēguma uzlādi/izlādi ar konstantu jaudu, balstoties RC modelī [33]. Taču līdz šim ne teorētiski, ne praktiski efektivitātes ziņā nav salīdzināta SC uzlāde/izlāde ar konstantu strāvu un SC uzlāde/izlāde ar konstantu jaudu pie vienādiem robežu nosacījumiem, proti, abos gadījumos gan uzlāde, gan izlāde notiek no vienādiem sākotnējiem spriegumiem līdz vienādiem beigu spriegumiem vienādos laikos, tāpēc to tika nolemts veikt promocijas darba gaitā, balstoties visplašāk izmantotajā reāla SC aizvietošanas modelī – RC ķēdē.

Darba struktūra

Darbs sastāv no ievada un četrām nodaļām.

Ievadā sniegts ieskats līdzšinējos pētījumos, kā arī izklāstītas izvirzītās hipotēzes, darba mērķi, uzdevumi un zinātniskās novitātes. Pirmajā nodaļā vispirms veikts vispārīgs apraksts par trolejbusa kustību kontakttīkla posmā un elektropārvades zudumiem, kā arī par EUS izmantošanu. Pēc tam izskaidrota trolejbusa kustības simulēšana *Matlab/Simulink* vidē un detalizēti izskaidrota elektriskā transporta rekuperētās enerģijas uzkrāšanas un izmantošanas

cikla shēma, ņemot vērā secīgus zudumus gan uzkrāšanas jeb EUS uzlādes procesā, gan izmantošanas jeb EUS izlādes procesā.

Otrajā nodaļā aprakstītas un salīdzinātas dažādas jaunas pieejas, kā modelēt elektriskā transporta elektropārvades zudumus kā viena trolejbusa kustības simulācijas gadījumā, tā divu vienā kontakttīkla posmā pārvietojošos trolejbusu kustību simulācijas gadījumā. Šīs pieejas iekļauj elektropārvades zudumu matemātisku aprēķinu, elektropārvades zudumu modelēšanu ar rezistoru elementu izmantošanu un elektropārvades zudumu modelēšanu ar sprieguma avota elementu izmantošanu. Prezentēti pilnā apakšstacijas enerģijas patēriņa simulāciju rezultāti pie dažādām gaisvadu kontakttīkla elektropārvades temperatūrām un arī praktisku līdzstrāvas līnijas temperatūras pieauguma izraisītā sprieguma krituma pieauguma mērīšanas eksperimentu rezultāti.

Trešajā nodaļā prezentēta jauna metode, kā modelēt SC EUS bez impulsu pārveidotāja iekšējo komutācijas procesu modelēšanas un sniegts ieskats par ekonomiskas un efektīvas mobilas EUS plānošanu un mērogošanu, ņemot vērā enerģijas apjomu, kādu reģenerē pilns transportlīdzeklis, bremzēdams no maksimāli atļautā kustības ātruma, un par EUS novecošanos ekspluatācijas laikā. Tikusi aplūkota vilces piedziņas invertora un EUS impulsu pārveidotāja lietderības koeficientu ietekme uz rekuperētās enerģijas uzkrāšanas un atkārtotas izmantošanas efektivitāti. Ticis pētīts, cik lielā mērā palielinās elektriskā transporta piedziņas elektriskās enerģijas patēriņš paātrināšanās laikā uz mobilas EUS papildu masas rēķina un vai šis pieaugums ir būtisks uz rekuperētās enerģijas izmantošanas iespējas fona. Piedāvāti varianti, kā aprēķināt mobilas EUS atmaksas periodu un peļņas apjomu, rēķinoties ar dažādiem mainīgiem faktoriem, piemēram, elektroenerģijas cenu, apakšstacijas enerģijas patēriņa samazinājumu utt.

Ceturtajā nodaļā veikts konstantas strāvas un konstantas jaudas SC uzlādes/izlādes efektivitāšu salīdzinājums pie vienādiem uzlādes/izlādes robežu nosacījumiem (vienādi sākuma un beigu spriegumi, vienādi uzlāžu un izlāžu ilgumi), balstoties RC (rezistors-kondensators) slēgumā, kas ir visplašāk izmantotais reāla SC aizvietošanas modelis liela mēroga SC EUS plānošanā. Ticis noskaidrots, ka saskaņā ar aprēķiniem RC slēgumā uzlāde/izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi/izlādi ar konstantu jaudu, un šī atšķirība palielinās gan pie ātrākām uzlādēm/izlādēm, gan pie lielākām iekšējām pretestībām R . Veikti arī īsta SC slēguma praktiski uzlādes/izlādes eksperimenti, kas salīdzināti ar attiecīgo situāciju simulāciju rezultātiem.

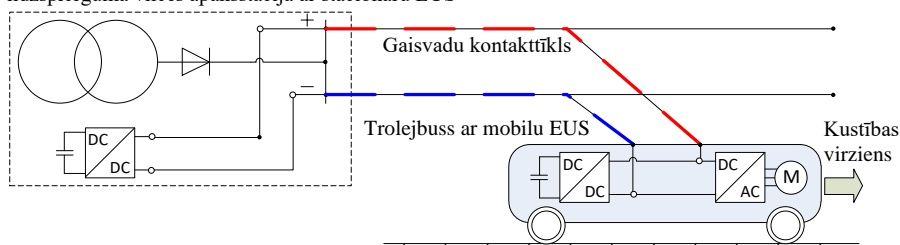
1. ELEKTRISKĀ SABIEDRISKĀ TRANSPORTA KUSTĪBAS VIRTUĀLA MODEĻĒŠANA UN ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU SISTĒMU IZMANTOŠANAS PRIEKŠROCĪBAS

Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta elektriskā transportlīdzekļa kustības modelēšanā trīs galvenie vērā ņemamie elementi ir barošanas jeb vilces apakšstacija, gaisvadu kontakttīkls un pats transportlīdzeklis, bet kā ceturtais vērā ņemamais elements var būt mobila un/vai stacionāra SC EUS. 1.1. attēlā ilustratīvi parādīta situācija ar apakšstaciju, kurā ierīkota stacionāra EUS, un ar ātrumu uzņemošu trolejbusu, kas aprīkots ar mobilu EUS.

1.1. Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta elektriskā transporta pārvietošanās

Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgtu elektrisko transportlīdzekli, piemēram, trolejbusu tā kustības laikā ar elektrisko enerģiju apgādā vilces apakšstacija, no kuras trolejbusam nepieciešamā jauda plūst pa gaisvadu elektropārvades līniju virzienā uz trolejbusu. Vilces apakšstacijās esošais transformators ir pieslēgts pie vidēja sprieguma vai augstsprieguma kabeļu līnijas un funkcionē kā spriegumu pazeminošs transformators, savukārt taisngriezis iezēdā dod 600 V līdzspriegumu. Noteikta daļa no elektriskās enerģijas, kas tiek pārvadīta no apakšstacijas uz trolejbusu, tiek zaudēta kontakttīkla vadu iekšējās pretestības dēļ, izpaužoties ar vadu silšanu. Šis elektropārvadē zaudētās enerģijas apjoms ir atkarīgs no attāluma starp trolejbusu un vilces apakšstaciju. Tātad, trolejbusam atrodoties tuvāk apakšstacijai, elektropārvadē zaudētās enerģijas apjomi būs mazāki, bet atrodoties tālāk no apakšstacijas, elektropārvadē zaudētās enerģijas apjomi būs augstāki.

600 V līdzsprieguma vilces apakšstacija ar stacionāru EUS



1.1. att. Trolejbusa kustība kontakttīkla posmā.

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 ģenerators režīmā, ģenerējama papildu elektrisko enerģiju, kas tiek saukta arī par reģenerēto vai rekuperēto enerģiju. Trolejbusos ir ierīkoti bremsēšanas rezistori, uz kuriem tiek novadīta rekuperētā enerģija, izkliedēdamās 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 bremzējot, otrs tajā pašā kontakttīkla posmā esošs trolejbus uzņem ātrumu. Turklāt trolejbus, kas uzņem ātrumu, var arī neabsorbēt visu bremzējošā trolejbusa reģenerēto jaudu, jo attiecīgā momentā pieprasītās jaudas apjoms var būt mazāks par reģenerēto. Tāpēc var uzskatīt, ka EUS nepieejamības gadījumā lielākā daļa no rekuperētās enerģijas tiek izkliedēta 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 gan bremzēšanas enerģijas uzkrāšanas procesā, gan uzkrātās enerģijas izmantošanas procesā. Taču mobilas EUS 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, kad trolejbusam nav šīs papildus noslodzes. Tomēr, no otras puses, šis trūkums tiek izkompensēts ar uzviju saistībā ar faktu, ka kustības laikā, izmantojot šajā mobilajā EUS pieejamās enerģijas apjomu, kas tika uzkrāts iepriekš bremzēšanas režīma laikā, būtiski samazinās kopējais apakšstacijas enerģijas patēriņš, salīdzinot ar situāciju, kad visa rekuperētā enerģija tiek izkliedēta bremžu rezistoros, kas arī tika pētīts un apstiprināts šajā darbā. 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. Mobilā EUS var tikt ievietota 1.2. attēlā parādītajā nodalījumā, kurš paredzēts dīzeļģeneratora vai mobilas EUS izvietošanai. Rīgā šobrīd visu 18 m garo 27Tr un standarta garuma 24Tr trolejbusu palīgnodalījumi ir aizņemti ar dīzeļģeneratoriem, tāpēc šos trolejbusus ir grūti aprīkot ar mobilām EUS, nedemontējot dīzeļģeneratorus, kuru nolietošanās gadījumā ir lietderīgi apsvērt iespēju trolejbusu aprīkot ar mobilu EUS, lai nebūtu jāveic dīzeļģeneratora kapitālais remonts.



1.2. att. Trolejbusa Škoda 24Tr atvērta motortelpa.

Stacionāru EUS izmantošanas gadījumā trolejbusam netiek radīta papildu noslodze, taču elektropārvades zudumi ir aktuāli, jo gan ātruma uzņemšanas laikā, kad EUS pieejamā enerģija tiek pārvadīta uz trolejbusu, gan bremsēšanas laikā, kad trolejbusa vilces piedziņas rekuperētā jauda tiek novadīta uz stacionāro EUS, zināma daļa enerģijas tiek zaudēta elektropārvadē. 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.

1.2. Pilnā enerģijas patēriņa samazināšana ar EUS palīdzību

Visbiežāk izmantotie enerģijas uzkrājēju elementi ir akumulatori un SC. Akumulatoru galvenā priekšrocība ir to augstais enerģijas blīvums. Līdz ar to akumulatoru baterijas ir energoietilpīgākas, salīdzinot ar SC, un ir spējīgas nodrošināt ilgākus transportlīdzekļa kustības autonomās gaitas režīmus, taču galvenais trūkums ir to salīdzinoši zemais jaudas blīvums. Līdz ar to akumulatori nav spējīgi nodrošināt jaudu priekš strauja transportlīdzekļa paātrinājuma un straujas rekuperatīvās bremsēšanas enerģijas uzkrāšanas. Ja tomēr notiek straujas akumulatoru uzlādes un izlādes ar lielu jaudu, tad būtiski samazinās to kalpošanas laiks. Savukārt SC galvenā priekšrocība ir to augstais jaudas blīvums. Līdz ar to salīdzinājumā ar akumulatoru baterijām SC ir spējīgi nodrošināt jaudu priekš strauja transportlīdzekļa paātrinājuma, bet tie nespēj nodrošināt ilgu transportlīdzekļa kustības autonomās gaitas režīmu.

Lai apvienotu abu iepriekš minēto enerģijas uzkrājēju elementu – akumulatoru un SC – atsevišķās priekšrocības un novērstu to atsevišķos trūkumus, tiek lietotas t.s. hibrīdās EUS, kas ir abu šo uzkrājēju elementu kombinējums. Taču turpmāk darbā tiks aplūkoti tikai SC, jo izvirzītais mērķis bija pie gaisvadu kontakttīkla piesaistīta elektriskā transporta – trolejbusu – reģenerētās enerģijas efektīva uzkrāšana bremsēšanas režīma laikā un efektīva atkārtota izmantošana nākamā ieskrējiena režīma laikā, nevis garu autonomā režīmā veicamo attālumu nodrošināšana. Hibrīdas EUS ir piemērotas autonomiem elektriskajiem transportlīdzekļiem, piemēram, elektriskajiem autobusiem, hibrīdajiem automobiļiem un bateriju elektromobiļiem.

1.3. attēlā parādītas trolejbusa vispārīgās un shematiskas kustības diagrammas, kas ietver paātrināšanos, vienmērīgu kustību un bremsēšanu iekļaujoša kustības cikla ātruma, jaudu, kontakttīkla sprieguma krituma un enerģiju shematiskas diagrammas situācijai bez EUS un situācijai ar EUS, kur paātrināšanās režīma laikā piedziņu ar nepieciešamo jaudu nodrošina gan EUS, gan barošanas apakšstacija. Redzamās diagrammas ir tikušas uzņemtas, veicot simulācijas ar darba gaitā lietotajiem *Matlab* modeļiem. Turklāt trolejbusa paātrināšanās režīma beigās EUS ir izlādējusies līdz minimāli pieļaujamajam sprieguma līmenim. Līdz ar to vienmērīgas kustības laikā piedziņu ar nepieciešamo jaudu apgādā tikai apakšstacija.

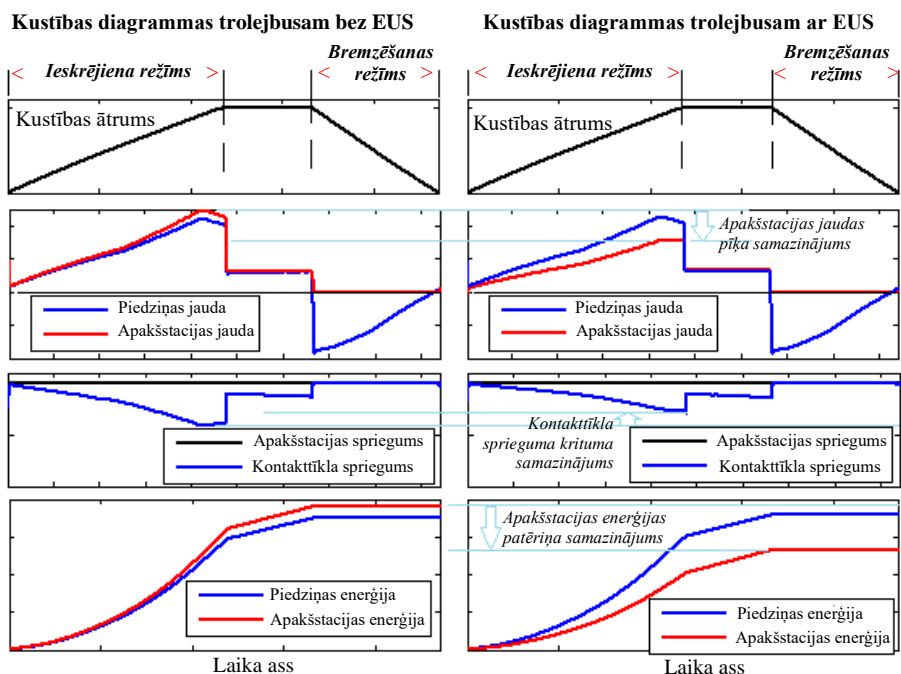
Kā redzams, elektriskā transporta paātrināšanās režīma beigu posmā ir visaugstākais piedziņas jaudas patēriņš jeb jaudas pīķis. Līdz ko paātrināšanās režīms beidzas un sākas vienmērīgas kustības režīms, tā trolejbusa piedziņas patērētās jaudas apjoms samazinās ar strauju kritienu. Toties situācijā bez EUS, apakšstacijas kopējā jauda visu laiku ir nedaudz augstāka par piedziņas jaudu, jo apakšstacijas kopējā jauda ietver ne vien piedziņas patērēto jaudu, bet arī, piemēram, elektropārvadē zaudēto jaudu, apakšstacijas iekšējo zudumu jaudu, vilces piedziņas invertorā zaudēto jaudu un arī jaudu, ar ko tiek kompensēti visi zudumi, lai

līdz vilces piedziņai nonāktu tāds jaudas apjoms, kāds nepieciešams trolejbusa pieprasītā kustības ātruma nodrošināšanai. Tādi paši apgalvojumi ir attiecināmi arī uz apakšstacijas kopējo patērēto enerģiju, kas visu laiku ir nedaudz augstāka par piedziņas patērēto enerģiju.

Bremzēšanas režīma laikā piedziņas jauda tiek attēlota ar mīnusa zīmi tāpēc, ka piedziņa jaudu nevis patērē, bet ģenerē/reģenerē, un šī reģenerētā jauda plūst virzienā prom no piedziņas. Visneekonomiskākais un energoneefektīvākais variants ir šīs reģenerētās jaudas novadīšana uz transportlīdzeklī esošiem bremžu rezistoriem, kuros tā tiek izkliedēta siltumā. Taču pastāv arī trīs varianti kā šo reģenerēto jaudu var lietderīgi izmantot:

- 1) Reģenerētā jauda var tikt novadīta uz kontakttīklu, kur to absorbē cits tajā pašā kontakttīkla posmā atrodošs trolejbuss, kurš attiecīgajā brīdī uzņem ātrumu;
- 2) Reģenerētā jauda var tikt novadīta uz barošanas apakšstaciju un tālāk tikt novadīta uz augstsprieguma tīklu, ja vien apakšstacija ir aprīkota ar reversīviem taisngriežiem;
- 3) Reģenerētā jauda var tikt uzkrāta mobilā EUS, kas uzmontēta uz trolejbusa borta, vai stacionārā EUS, kas ierīkota apakšstacijā vai pieslēgta pie gaisvadu kontakttīkla.

Attiecībā uz pirmo no augstāk minētajiem variantiem, ne pārāk bieži gadās tādas situācijas, kad, vienam trolejbusam bremzējot, otrs tajā pašā posmā esošs trolejbuss uzņem ātrumu, efektīvi absorbēdams bremzējošā trolejbusa reģenerēto jaudu. Savukārt otrais variants, piemēram, Rīgas apstākļos nav iespējams, jo Rīgā esošās barošanas apakšstacijas nav aprīkotas ar reversīvajiem taisngriežiem un arī netiek plānots tās šādi aprīkot. Tāpēc trešais variants, t.i. reģenerētās enerģijas uzkrāšana iekš EUS un uzkrātās enerģijas izlietošana nākamā ieskrējiena laikā ir uzskatāms par iespējamāko un ekonomiskāko variantu, ja vien EUS ir pieejama.



1.3. att. Trolejbusa kustības vispārinātas diagrammas gadījumiem ar un bez EUS.

1.3. attēla shematiskajās diagrammās var redzēt trīs priekšrocības gadījumam, kurā trolejbusam ir pieejama uzlādēta EUS, kas ieskrējiena režīmā trolejbusa piedziņu nodrošina ar daļu no nepieciešamās jaudas, salīdzinot ar gadījumu, kurā nav pieejama EUS:

1) no barošanas apakšstacijas tiek ņemts mazāk jaudas paātrinājuma režīmā, tādējādi samazinot kontakttīkla noslodzi;

2) jo mazāk jaudas tiek ņemts no apakšstacijas, jo mazāki elektropārvades zudumi, ko parāda mazāks kontakttīkla spriegums kritums, kas atbilst apakšstacijas sprieguma un vilces piedziņas sprieguma starpībai;

3) mazāks pilnais apakšstacijas enerģijas patēriņš.

2004. gada avotā, kas ir viens no pirmajiem, kurā tiek aplūkota iespēja EUS izmantot elektriskajā transportā, [34] ir piedāvāts priekšlikums elektriskā transporta gaisvadu kontakttīklam pieslēgt stacionāras SC balstītas 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 reģenerētā enerģija tiek izkliedēta siltumā, tomēr nav pieminēts, ka pastāv iespēja reģenerēto enerģiju novadīt uz kādu citu transportlīdzekli, kas atrodas tajā pašā kontakttīkla posmā un paātrinās. Pirmās EUS ierīkotas Londonas metro, izmantojot rotējošas kinētiskās enerģijas tehnoloģijas [35], [36]. Pirmās SC balstītās EUS tikušas ierīkotas Ķelnē, Vācijā [37], [38].

Avotā [38] 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 samazinājušies tās energoietilpība, tāpēc daļa no reģenerētās enerģijas tiek izkliedēta bremsu rezistoros. Arī [24] 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 reģenerētās 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.

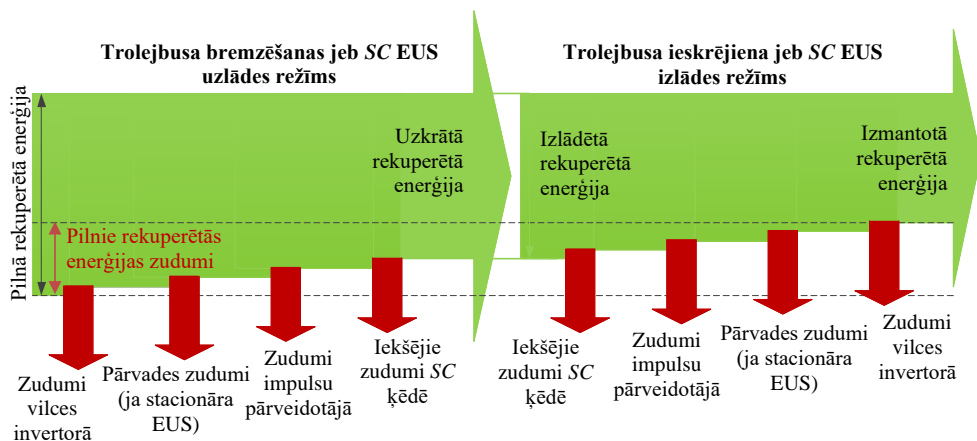
Avotā [19] analizēta arī EUS impulsu pārveidotāja lietderības koeficienta ietekme uz ietaupītās enerģijas apjomu, taču nav analizēta piedziņas invertora efektivitātes ietekme uz ietaupītās enerģijas apjomu. Tāpat, kā caur impulsu pārveidotāju, arī caur vilces invertoru reģenerētā enerģija viena pilna EUS uzlādes/izlādes cikla laikā iziet cauri divas reizes. Līdz ar to ir saprotams pamats 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.

1.3. Rekuperētās enerģijas zudumu modelēšana

Apsverot iespēju par EUS plānošanu ar mērķi uzkrāt un atkārtoti izmantot elektriskā transporta bremsēšanas laikā rekuperēto enerģiju, ir jārēķinās ar to, ka pastāv noteiktu veidu zudumi gan rekuperētās enerģijas uzkrāšanas jeb akumulēšanas procesā, gan rekuperētās enerģijas, kas iepriekš tikusi uzkrāta EUS, izmantošanas procesā.

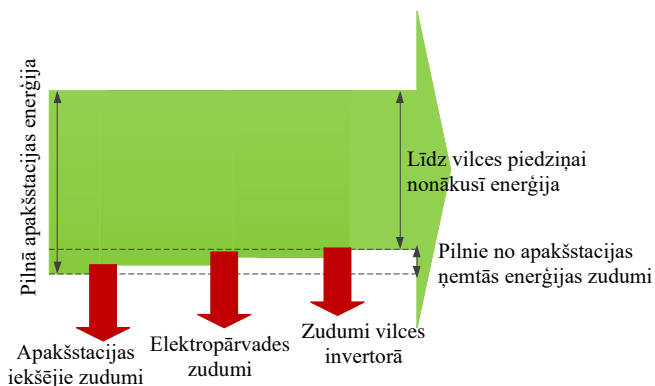
1.3.1. Elektriskā transporta rekuperētās enerģijas zudumi uzkrāšanas un atkārtotas izmantošanas procesos

Trolejbusa rekuperētās enerģijas uzkrāšanas un izmantošanas jeb dzīves cikla diagramma redzama 1.4. attēlā, lai detalizēti izskaidrotu, kā turpmākajā pētniecības darbā tika ņemti vērā visi iespējamie zudumi rekuperētās enerģijas utilizēšanas procesā. Sākotnējai pilnajai rekuperētai enerģijai atbilst sākums 1.4. attēla kreisajā pusē attēlotai zaļajai simboliskajai bultai, kas attiecīgu zudumu dēļ paliek šaurāka, un līdzīgi ir nākamo bultu, kas simbolizē izlādēto enerģiju. EUS uzlādes procesā elektriskā transporta rekuperētā enerģija vispirms izplūst caur elektriskā transporta piedziņas invertoru, kurā zināma daļa no tās tiek zaudēta. Pēc tam, ja esošā EUS ir stacionāra, daļa no atlikušās rekuperētās enerģijas tiek zaudēta pārvades laikā gaisvadu elektriskās pretestības dēļ, bet, ja esošā EUS ir mobila, tad elektropārvades zudumi nav aktuāli, ja vien nenotiek enerģijas apmaiņa starp atsevišķu trolejbusu mobilajām EUS. Tālāk daļa no atlikušās rekuperētās enerģijas tiek zaudēta EUS impulsu pārveidotājā. Visbeidzot no rekuperētās enerģijas daļas, kas izplūst caur impulsu pārveidotāju, daļa izkliedējas siltumā SC iekšējās pretestības dēļ. Savukārt EUS izlādes procesā rekuperētā enerģija, kas iepriekš tikusi veiksmīgi uzkrāta, plūst uz vilces piedziņu caur tām pašām iekārtām, tikai pretējā secībā. Tādējādi var secināt, ka piedziņas invertora un EUS impulsu pārveidotāja lietderības koeficienti var atstāt visai ievērojamu ietekmi uz rekuperētās enerģijas uzkrāšanas un izmantošanas efektivitāti, it īpaši tāpēc, ka rekuperētā enerģija pilna EUS uzlādes/izlādes cikla laikā caur katru no minētajām iekārtām plūst cauri divas reizes.



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

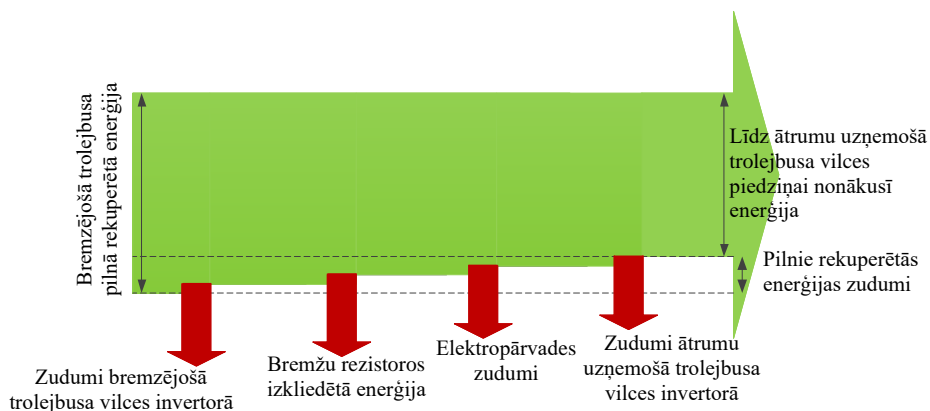
Elektriskajam transportlīdzeklim līdzās vilces piedziņai, ir arī dažāds papildu aprīkojums, kas patērē noteiktus enerģijas apjomus, piemēram, apgaismojums, durvju atvēršana/aizvēršana utt., taču kopumā šīs iekārtas patērē maznozīmīgu enerģijas daudzumu, salīdzinot ar piedziņas patērēto enerģijas daudzumu. Toties ievērojamu enerģijas apjomu var patērēt gaisa kondicionēšanas sistēmas vasaras sezonā un apkures sistēmas ziemas sezonā. Turklāt tieši bremsēšanas laikā zināma daļa rekuperētās enerģijas tiek automātiski izmantota iepriekš minēto pašpatēriņa aprīkojumu darbināšanai. Promocijas darbā tika pieņemts, ka transportlīdzeklī tā pārvietošanās laikā nefunkcionē ne gaisa kondicionēšanas sistēmas, ne apkures sistēmas, līdz ar to papildu aprīkojuma enerģijas patēriņš netika ņemts vērā. 1.5. attēlā parādīts no apakšstacijas ņemtās enerģijas ceļš uz vilces piedziņu, un šajā gadījumā tika ņemti vērā trīs enerģijas zudumu faktori - apakšstacijas iekšējie zudumi transformatorā un taisngriezī, elektropārvadē zaudētā enerģija un vilces invertorā zaudētā enerģija.



1.5. att. No apakšstacijas ņemtās enerģijas ceļa līdz trolejbusa piedziņai shēma.

1.3.2. Elektriskā transportlīdzekļa rekuperētās enerģijas zudumi, novadot uz citu paātrinājošo transportlīdzekli

Ja apakšstacija nav reversīva un nav pieejama ne mobila, ne stacionāra EUS, tad vienīgais rekuperētās enerģijas lietderīgas izmantošanas variants ir tās novadīšana uz citu tajā pašā posmā atrodošos trolejbusu, kas konkrētā brīdī uzņem ātrumu. 1.6. attēlā parādīts bremsējoša trolejbusa rekuperētās enerģijas plūsma uz tajā pašā kontakttīkla posmā esošu paātrinājošo trolejbusu. Rekuperētās enerģijas zudumiem ir šāda secība: zudumi bremsējošā trolejbusa vilces invertorā, elektropārvades zudumi, zudumi ātrumu uzņemošā trolejbusa invertorā. Ja bremsējošais trolejbuss rekuperē vairāk enerģijas, nekā pieprasa ātrumu uzņemošais trolejbuss, tad atlikusī enerģija tiek izkliedēta siltumā bremsžu rezistoros.



1.6. att. Bremsējoša trolejbusa rekuperētās enerģijas ceļa līdz ātrumu uzņemošam trolejbusam shēma.

1.4. Trolejbusa kustības matemātiskā modelēšana

Lai varētu izstrādāt trolejbusa kustības matemātisku modeli, ar kuru veicot simulācijas, var iegūt attiecīgā trolejbusa raksturlielnes, kas tuvināti atbilst reālām situācijām, t.sk. kustības ātruma, jaudas patēriņa, enerģijas patēriņa u.c., ir jāzina reālā modeļa mehāniskie un elektriskie parametri. 1.1.tabulā ir parādīti 27Tr tehniskie dati. 1.7. attēlā redzams trolejbuss 27Tr.



1.7. att. Trolejbuss 27Tr

1.1.tabulā ar oranžu krāsu iekrāsotās šūnās minēti tie parametri, kas modelī tiek ievadīti kā ieejas dati un atstāj būtisku ietekmi uz simulāciju rezultātiem. Ar dzeltenu krāsu iekrāsotās šūnās minēti tie parametri, kas arī tiek ievadīti modelī kā ieejas dati, bet visu laiku ir nemainīgi un neatkarīgi no trolejbusa veida.

1.1. tabula

Trolejbusa 27Tr fizikālie parametri.

Detāļas	27Tr
Garums (m)	18
Platums (m)	2,55
Augstums (m)	3,45
Sēdvietu skaits	42
Maksimālā pasažieru kapacitāte (skaits)	154
Priekšējās virsmas laukums (m ²)	8,7975
Velkošās ass reduktora pārnese skaitlis	6,2
Tukša transportlīdzekļa masa (kg)	19000
Vilces dzinēja nominālā jauda (kW)	250
Reduktora lietderības koeficients (%)	96,06
Riteņa diametrs (270/70, R22,5) (m)	0,9565
Brīvās krišanas paātrinājums (m/s ²)	9,81
Rites berzes koeficients	0,015
Gaisa pretestības koeficients	0,7
Gaisa blīvums (m/s ³)	1,225

Trolejbusa mehāniskie un kinemātiskie vienādojumi

Trolejbusa kustības inerce ir atkarīga no tā masas, riteņu diametra un reduktora koeficienta. Lai tiktu ievērota inerce, modelī uz vilces dzinēja vārpstu it jāreducē trolejbusa kustības inerces moments, kas tiek aprēķināts pēc formulas:

$$J_{\text{trol}} = m \frac{D^2}{4k_{\text{red}}^2}, \quad (1.1.)$$

kur m – trolejbusa pilnā masa, kg;

D – trolejbusa riteņa diametrs, m;

k_{red} – reduktora koeficients.

Pieņemot, ka trolejbusa riepiem rites berzes koeficients ir $\mu = 0,015$ [12] un brīvās krišanas paātrinājums $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, kopējais rites berzes pretestības spēks, kāds darbojas uz visiem trolejbusa riteņiem ir aprēķināms pēc formulas:

$$F_b = \mu mg \cos \alpha, \quad (1.2.)$$

kur m – trolejbusa pilnā masa, kg;

α – kustības slīpuma leņķis, °.

1.1. un 1.2. formulās trolejbusa pilnā masa bez pašmasas un pasažieru kopējās masas iekļauj arī mobilas EUS masu, ja vien trolejbus ir aprīkots ar mobilu EUS.

Rites berzes moments T_b tiek aprēķināts pēc formulas:

$$T_b = F_b r, \quad (1.3.)$$

kur F_b – berzes pretestības spēks, N;
 r – riteņa rādiuss, m.

Gaisa pretestības spēks F_d tiek aprēķināts pēc formulas:

$$F_d = C_d A \rho \frac{V^2}{2}, \quad (1.4.)$$

kur $C_d = 0,7$ – trolejbusa priekšējās virsmas aerodinamiskais gaisa pretestības koeficients [44];
 $\rho = 1,225$ – gaisa blīvums, kg/m^3 ;
 A – trolejbusa priekšējās virsmas laukums, m^2 ;
 V – trolejbusa kustības ātrums, m/s .

Trolejbusa kustības ātrums V (m/s) ir atkarīgs no dzinēja rotācijas ātruma un tiek aprēķināts pēc formulas:

$$V = \frac{\pi D n}{60 k_{red}}, \quad (1.5.)$$

kur n – trolejbusa vilces dzinēja rotācijas ātrums, min^{-1} ;
 D – riteņa diametrs, m;
 k_{red} – velkošās ass reduktora pārnese skaitlis.

Lai aprēķinātu trolejbusa kustības ātrumu km/h , 1.5. izteiksme ir jāreizina ar 3,6. Gaisa pretestības spēka momentu aprēķina, reizinot gaisa pretestības spēku F_d ar riteņa rādiusu r :

$$T_d = F_d r, \quad (1.6.)$$

kur r – riteņa rādiuss, m.

Pārnese kārba atrodas starp dzinēja vārpstu un riteņiem. Kad dzinēja vārpsta griež pārnese kārba esošos zobratus, riteņu rotācijas ātrums ir k_{red} reizes mazāks par dzinēja vārpstas rotācijas ātrumu. Pārnese kārba lietderības koeficients ietekmē izejas momentu T_o , nevis riteņa rotācijas ātrumu:

$$T_o = T_M k_{red} \eta, \quad (1.7.)$$

kur T_M – dzinēja vārpstas moments, Nm ;
 η – pārnese kārba lietderības koeficients.

Kopējais pretestības spēku moments T_p , kas reducējas uz dzinēja vārpstu, tiek aprēķināts kā rites berzes pretestības spēka momenta un gaisa pretestības spēka momenta summa, kas dalīta ar velkošās ass reduktora pārnese skaitli un reduktora kārba lietderības koeficienta reizinājumu:

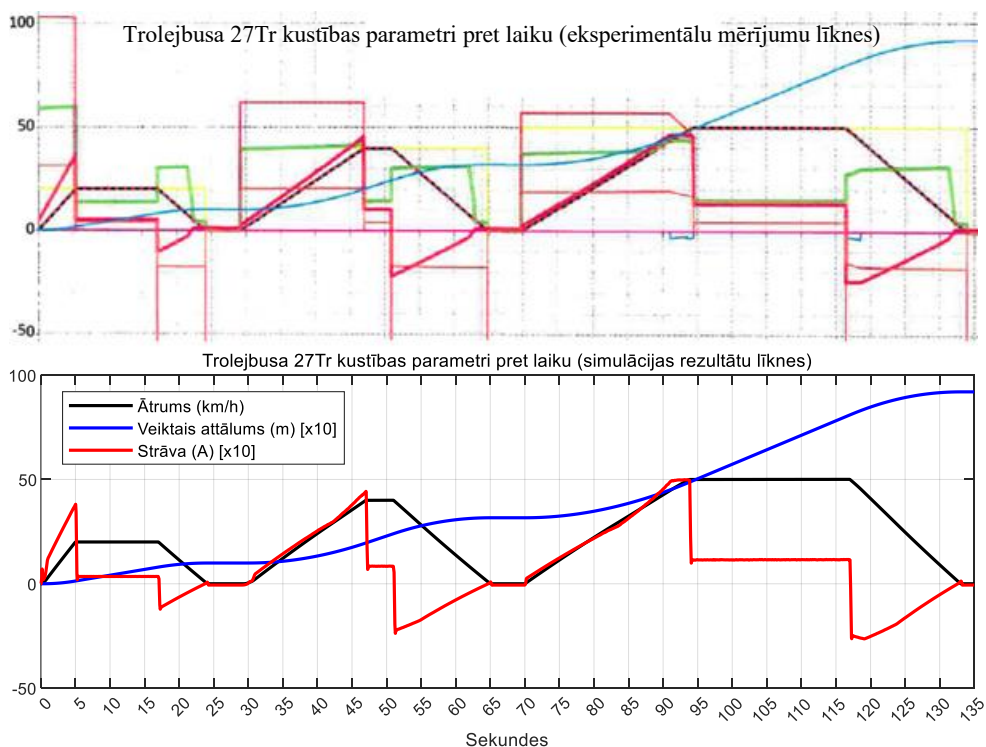
$$T_p = \frac{(T_b + T_d)}{k_{red} \eta}. \quad (1.8.)$$

Lai varētu simulēt trolejbusa kustības ciklu, kas iekļauj paātrināšanos, vienmērīgu kustību un bremzēšanu, tika izmantota tiešās momenta vadības metode. Avotos [21] un [22] aprakstīts

EUS modelis un tā vadības sistēma, taču šī darba trešajā nodaļā tiks aprakstīta metode, kā simulēt SC EUS darbību bez impulsu pārveidotāja modulācijas procesu simulēšanas.

Trolejbusa simulācijas rezultātu salīdzinājums ar eksperimentāliem datiem

1.8. attēla augšējā daļā parādītas trolejbusa Škoda 27Tr kustības eksperimentāli uzņemtas ātruma, veiktā attāluma un strāvas raksturlīknes pret laiku sekundēs. Trolejbusa deklarētā pilnā masa ir bijusi 24,75 tonnas. 135 sekundēs, kuru laikā trolejbuss veic aptuveni 900 m attālumu, iekļautas trīs kustības posmi ar ieskrējiena režīmiem, kuros ātrums pieaug lineāri, vienmērīgas kustības režīmiem un bremsēšanas režīmiem, kuros ātrums samazinās lineāri. Var secināt, ka eksperimenti tikuši veikti uz līdzena ceļa un ārpus intensīvas satiksmes, jo ātruma izmaiņas līknēm ir idealizētas trapecveida formas. Kā redzams, pirmajā kustības posmā trolejbuss paātrinās līdz 20 km/h, otrajā – līdz 40 km/h un trešajā – līdz 50 km/h. Lai arī reālā satiksmē ātruma raksturlīknēm visbiežāk nav šādas idealizētas trapecveida formas, tomēr eksperimentālos un pētnieciskos nolūkos pētīt trolejbusa kustības energoefektivitāti, var izmantot idealizētas ātruma līknes. Turpmāk darbā bieži tika aplūkots trešā kustības posma gadījums, kurā trolejbuss paātrinās līdz 50 km/h vienmērīgi aptuveni 23,8 sekunžu laikā.



1.8. att. Trolejbusa kustības eksperimentālo rezultātu un simulācijas rezultātu salīdzinājums.

Ja eksperimentālajos mērījumos būtu iekļauta piedziņas sprieguma līkne, tad pēc sprieguma kritumiem paātrināšanās režīmos varētu spriest par aptuveniem attālumiem starp trolejbusu un

apakšstaciju. Tāpēc tika pieņemts, ka trolejbusa kustības uzsākšanas sākumā atradās ļoti tuvu barošanas apakšstacijai un sākotnējā elektropārvades pretestība bija nulle, bet uzsākot kustību, elektropārvades pretestība pieauga atbilstoši attālumam starp apakšstaciju un trolejbusu. Palielinoties elektropārvades pretestībai, attiecīgi pieaug arī piedziņas strāva, lai izkompensētu sprieguma kritumu, tādējādi nodrošinot trolejbusu ar nepieciešamo jaudu, taču par elektropārvades pretestības aprēķināšanu un zudumu kompensēšanu sīkāk aprakstīts 2. nodaļā. Salīdzinot eksperimentālo un simulāciju rezultātu raksturlieknes, var secināt, ka turpmākajā darbā izmantotais trolejbusa virtuālais matemātiskais modelis kustības simulāciju gaitā dod rezultātus, kas kopumā ir tuvināti precīzi reāla trolejbusa kustības parametriem aptuveni 95 % apmērā. Tātad darbā izmantotais trolejbusa virtuālais modelis dod reālam trolejbusam tuvinātus simulāciju rezultātus ar +/-5 % nobīdēm no precīzajiem rezultātiem. Šāda neprecizitāte ir pieļaujama, lai doto modeli varētu izmantot priekš turpmākiem pētījumiem.

Ir jāatzīmē arī tas, ka darba galvenais mērķis nebija pilnīgi precīza trolejbusa kustības virtuāla modeļa izstrāde. Viens no pamatmērķiem bija izstrādāt jaunas elektropārvades pretestības modelēšanas un simulēšanas pieejas, par kurām aprakstīts 2. nodaļā, un kuras būtībā var izmantot praktiski pie jebkura cita, ne tikai 27Tr, pie gaisvadu kontaktīkla pieslēgta elektriskā transportlīdzekļa kustības simulēšanas. Otrs no pamatmērķiem bija izstrādāt mobila SC EUS plānošanas un aprēķināšanas metodi un izpētīt optimālas to izlādes stratēģijas, par kurām aprakstīts 3. nodaļā. Turklāt aprakstītās SC EUS aprēķināšanas metodes var pielietot pie jebkura cita, ne tikai 27Tr, trolejbusa mobila SC EUS plānošanas. Beigās secināts, ka iegūstot trolejbusa piedziņas patērētās un rekuverētās jaudas skaitliskās vērtības jeb raksturlieknes pie noteiktām trolejbusa masām, tās var izmantot gan elektropārvades zudumu aprēķināšanā jeb simulēšanā pie dažādiem attālumiem starp trolejbusu un apakšstaciju, gan mobila SC EUS plānošanā priekš attiecīgā transportlīdzekļa.

1.5. Secinājumi

Izmantojot mobila un/vai stacionāras EUS, ir iespējams samazināt no apakšstacijas ņemtās enerģijas apjomus, pateicoties iespējai bremsēšanas režīma laikā uzkrāt rekuverēto enerģiju, kuru nākošā paātrināšanās režīma laikā var lietderīgi izmantot. Mobila EUS gadījumā trolejbus tiek noslogots ar papildus masu, bet rekuverētās enerģijas uzkrāšanas un izmantošanas laikā tās zudumi elektropārvadē nav aktuāli. Savukārt stacionāru EUS gadījumā trolejbus netiek noslogots ar papildus masu, bet rekuverētās enerģijas uzkrāšanas un izmantošanas laikā tās zudumi elektropārvadē ir aktuāli.

Modelējot trolejbusa rekuverētās enerģijas uzkrāšanu EUS un atkārtotu izmantošanu nākamajā paātrināšanās režīmā, ir jāreķinās ar zudumiem vilces piedziņas invertorā, zudumiem elektropārvadē stacionāru EUS gadījumā, zudumiem EUS impulsu pārveidotājā un zudumiem SC elementos. 27Tr trolejbus tika izvēlēts kā šablons, ar kura palīdzību tika veikti turpmāk aprakstītie pētījumi par otrajā nodaļā aprakstītajām elektropārvades zudumu modelēšanas pieejām un par mobila SC EUS plānošanu trešajā nodaļā. Lai arī turpmākie pētījumi, kas attiecas uz elektrotransporta kustību, ir veikti, balstoties 27Tr kustības simulācijās, tomēr simulāciju rezultāti ir ļoti tuvināti reālām situācijām ar aptuveni 95 % precizitāti.

2. JAUNAS PIEEJAS ELEKTRISKĀ TRANSPORTA KONTAKTTĪKLA ELEKTROPĀRVADES ZUDUMU APRĒĶINĀŠANĀ UN SIMULĒŠANĀ

Veicot aprēķinos un simulācijās balstītus pētījumus par elektriskā transportlīdzekļa, kas piesaistīts gaisvadu kontakttīklam, piemēram, trolejbusa, energoefektivitāti pārvietošanās laikā un pilno enerģijas patēriņu pie kādiem noteiktiem, iepriekš definētiem apstākļiem, ir jāaprēķinās ar zudumiem gaisvadu kontakttīklā. Trolejbusam pārvietojoties, tā atrašanās vieta kontakttīkla posmā nepārtraukti mainās, līdz ar to kontakttīkla elektropārvades pretestība posmā starp barošanas apakšstaciju un trolejbusu ir mainīgs lielums. Trolejbusam pārvietojoties, tā atrašanās vieta kontakttīkla posmā nepārtraukti mainās, līdz ar to starp barošanas apakšstaciju un trolejbusu esošais kontakttīkla posma garums ir mainīgs lielums. Tātad kontakttīkla elektropārvades pretestība attiecībā pret trolejbusu mainās kā funkcija no attāluma starp kontakttīkla barošanas apakšstaciju un trolejbusu.

Kad trolejbuss uzņem ātrumu un pārvietojas, attālinādamies no apakšstacijas, trolejbusa piedziņas spriegums samazinās saskaņā ar sprieguma krituma esamību kontakttīklā. Tātad, ja apakšstacijas spriegums ir vienāds ar 600 V, trolejbusa piedziņas spriegums krītas zem šīs vērtības ar tādu intensitāti, kas ir atkarīga no elektropārvades līnijas elektriskās pretestības un pa to plūstošās strāvas stipruma, jo abu šo parametru reizinājums atbilst sprieguma kritumam līnijā. Savukārt pretējā situācijā, kad trolejbuss pārvietojas, tuvodamies apakšstacijai, sprieguma kritums kontakttīklā samazinās un trolejbusa piedziņas spriegums attiecīgi pieaug.

Lai tiktu nodrošināts trolejbusa kustības ātruma pieaugums noteiktā laika periodā vai arī vienmērīgs pārvietošanās ātrums, ir nepieciešams noteikts elektriskās jaudas apjoms, kas tiek ņemts no barošanas apakšstacijas, no kuras pa gaisvadu kontakttīkla līniju tas tiek novadīts uz trolejbusa piedziņu. Pat pie esošiem neizbēgamiem elektropārvades zudumiem prasītais trolejbusa kustības ātrums tik un tā tiek nodrošināts, jo tā kā elektriskās jaudas apjoms ir vienāds ar strāvas un sprieguma reizinājumu, tad no apakšstacijas tiek ņemta stiprāka strāva, lai izkompensētu līnijas sprieguma kritumu, tādējādi rezultātā iegūstot nepieciešamo jaudu prasītā trolejbusa kustības ātruma nodrošināšanai.

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

Jebkura vada šķērsriezuma laukums un izmantotā vadošā materiāla īpatnējā elektriskā pretestība ir ļoti būtiski parametri, no kuriem ir atkarīga vada elektriskā pretestība R , kas tiek aprēķināta pēc 2.1. formulas.

$$R = \frac{l\rho}{S}, \quad (2.1.)$$

kur l – vada garums, m;

ρ – vada vadošās daļas materiāla īpatnējā elektriskā pretestība, Ωm ;

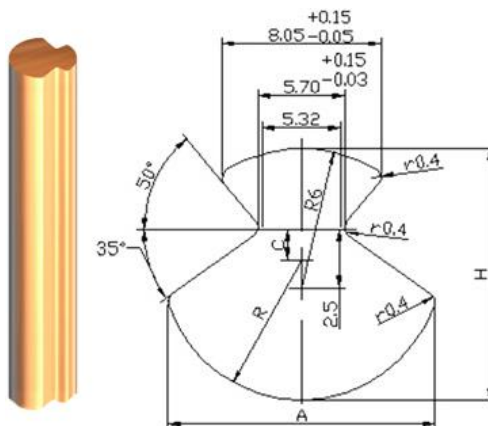
S – vada šķērsriezuma laukums, m^2 .

Turpmāk promocijas darbā pieņemts, ka trolejbusa kontakttīkla sekcija sastāv no vara vadiem *MF-100*, kuru šķērsgriezuma laukums $S = 100 \text{ mm}^2$ atbilst Rīgas Satiksmes vidējam kontaktvadu šķērsgriezuma laukumam. 2.1. attēlā parādīta visbiežāk lietoto kontakttīkla vadu tipiska ģeometriskā forma un šķērsgriezuma laukuma rasējums, savukārt attiecīgie skaitliskie dati *MF-100* vadam minēti 2.1. tabulā [39].

2.1. tabula

Kontaktvada MF-100 fizikālie parametri

Vada marka	Vada šķērsgriezuma laukums, mm^2	Vada dimensijas, mm				1 km gara vada aptuvenā masa, kg
		A	H	C	R	
<i>MF-100</i>	100	$12,81 \pm 0,25$	$11,8 \pm 0,11$	1,8	7	890



2.1. att. Kontaktvada MF-100 ģeometriskā forma un šķērsgriezuma rasējums.

Saskaņā ar vispārīgās fizikas tabulām tīra vara īpatnējā pretestība ir $\rho = 1,678 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ pie $20 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūras, taču praksē vara vadu faktiskā īpatnējā pretestība ir nedaudz augstāka, jo vadošā daļa visbiežāk nesastāv no tīra vara, bet vara sakausējuma ar dažādiem piejaukumiem, piemēram, alvas vai kadmija, lai uzlabotu vada izturību. Parasti vara vadu faktiskā elektriskā pretestība R , kas līdzās definētiem vada vadošās daļas ģeometriskiem izmēriem pieminēta ražotāja tehniskajā dokumentācijā, mēdz būt par 5 – 20 % augstāka par rezultātu, kāds tiek iegūts aprēķināšanas ceļā ar 2.1. izteiksmi pie iepriekš minētās tīra vara īpatnējās pretestības. Piemēram, [40] ir pieminēts, ka vadam *MF-100* īpatnējā pretestība pie $20 \text{ }^\circ\text{C}$ parasti nav augstāka par $1,77 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, un šī maksimālā vērtība iznāk par aptuveni 5,5 % augstāka, salīdzinot ar gadījumu, kad *MF-100* vadošo daļu pieņem par tīru varu, tāpēc arī turpmākos aprēķinos tiks pieņemts, ka vada *MF-100* īpatnējā pretestība $\rho = 1,77 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

Lai arī zinātniskajā un tehniskajā literatūrā vadu pretestības aprēķinos gandrīz vienmēr tiek pieņemts, ka attiecīgā materiāla temperatūra ir $20 \text{ }^\circ\text{C}$, nedrīkst aizmirst arī faktu, ka jebkurai vielai, tajā skaitā arī varam, īpatnējā pretestība ir mainīga atkarībā no vielas jeb materiāla temperatūras. Šādā gadījumā vada pretestība R , kas aprēķināta ar 2.1. izteiksmi, mainās proporcionāli īpatnējās pretestības ρ izmaiņai. Tāpēc pie noteiktas temperatūras faktisko vada

pretestību R var aprēķināt, izmantojot tā saukto atskaites pretestību R_{ref} , kura šajā gadījumā atbilst $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ atskaites temperatūrai T_{ref} , savukārt faktiskās vada pretestības aprēķina formula pie noteiktas temperatūras T ir šāda:

$$R = R_{\text{ref}}[1 + \alpha(T - T_{\text{ref}})], \quad (2.2.)$$

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 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, pretestība pieaug par $0,393\%$. Gadījumā, kad materiāla temperatūra palielinās par $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, pretestība pieaug attiecīgi par $3,93\%$. Šī atšķirība nav būtiska, ja pieņem, ka vērā ņemama pretestības izmaiņa ir, piemēram, pie 5% atšķirības sliekšņa sasniegšanas. 2022. gada ziemā Latvijas vidējā temperatūra bija – $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, vasarā $+18,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, līdz ar to dažādos gadalaikos var atšķirties intensitāte, ar kādu apkārtēja vide gaisvadus atdzēsē. Tāpēc apakšnodaļā 2.5 sniegts neliels ieskats, kā vadu temperatūra ietekmē pārvades zudumu apjomu trolejbusa 27Tr kustības laikā. Taču pārējos aprēķinu gadījumos tiks pieņemts, ka vadu temperatūra ir $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

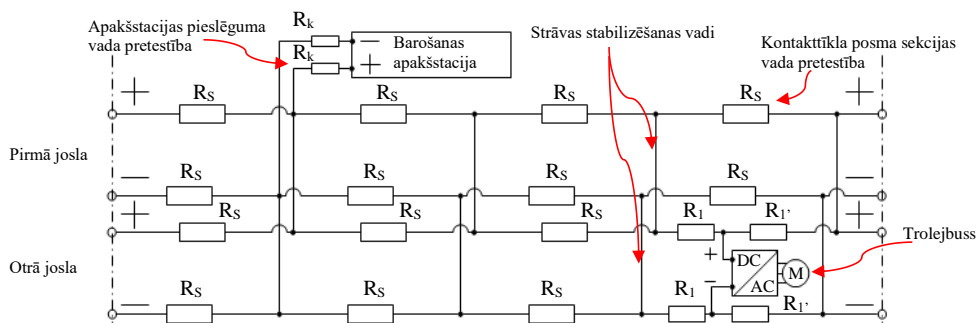
Praktiskākos gadījumos vadu pretestības aprēķinā mēdz ņemt vērā arī vadu nodilumu, jo trolejbusa strāvas noņēmējs vadus pakāpeniski nodeldē, kā rezultātā arī *MF-100* vada šķērsriezuma laukums kļūst mazāks par 100 mm^2 un sakarā ar to palielinās pretestība. Apvienojot 2.1. un 2.2. formulas, var uzrakstīt detalizētāku pretestības R aprēķināšanas formulu, kur tiek ņemts vērā arī vadu nodilums, kas apzīmēts ar koeficientu k :

$$R = \frac{l\rho[1 + \alpha(T - T_{\text{ref}})]}{Sk}. \quad (2.3.)$$

Nodiluma koeficients k raksturo vada procentuālo nodilumu un pie noteikta nodiluma sasniegšanas vadi tiek nomainīti, taču turpmāk darbā veiktajās trolejbusu kustību datorsimulācijās pie elektropārvades pretestības aprēķina tika pieņemts, ka esošie gaisvadi ir kā jauni ar 100 mm^2 šķērsriezuma laukumu.

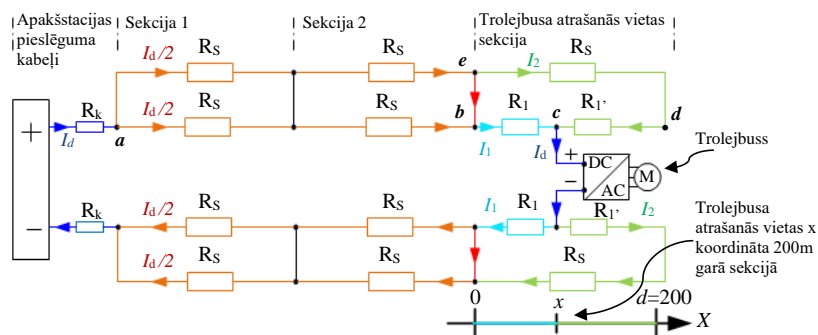
2.1.1. Elektriskās pretestības aprēķināšanas formulas izvedums divvirzienu kontakttīkla posmam starp apakšstaciju un trolejbusu

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 var pieņemt, ka arī gaisvadu kontakttīkla atsevišķie posmi ir ar divvirzienu satiksmi, jo katrai no joslām ir savs pozitīvās (+) un negatīvās (–) polaritātes kontaktvadu pāris. Tāpēc pārsvarā vienmēr tiek izmantota iespēja ar strāvas stabilizēšanas vadiem saslēgt paralēli minēto divu joslu kontaktvadu pārus, tādējādi samazinot pārvades pretestību. Aprakstītā situācija ar gaisvadu kontakttīkla posmu, kur abu joslu (+) un (–) polaritātes vadi saslēgti paralēli, redzama 2.2. attēlā. Rezistori simbolizē attiecīgu sekciju vadu pretestības, un trolejbuss, kura piedziņa shēmā apzīmēta ar inverteru un maiņstrāvas dzinēju, kā redzams, atrodas vienā no divām kustības virzienu joslām.



2.2. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskā shēma.

Strāvas stabilizēšanas vadi mazo garumu dēļ var neievērot to pretestības, tāpēc arī 2.2. attēlā šie vadi ir bez rezistoriem. Turpmāk promocijas darbā pieņemts, ka kontakttīkla posms sastāv no 200 m garām sekcijām un katras sekcijas vada pretestība saskaņā ar 2.1. formulu atbilst $R_s = 0,0354 \Omega$. Lai uzskatāmi attēlotu strāvu plūsmu no apakšstacijas līdz trolejbusam gaisvadu kontakttīkla posmā, 2.2. attēlā redzamo shēmu var ekvivalenti pārveidot, attēlojot abu joslu pozitīvās polaritātes vadus augšpusē un abu joslu negatīvās polaritātes vadus – apakšpusē, kā redzams 2.3. attēlā. No apakšstacijas ņemtā strāva I_d mezglā a sadalās divās vienādās daļās, kas plūst virzienā uz trolejbusu pa tām sekcijām, kuras atrodas pirms trolejbusa atrašanās vietas sekcijas. Trolejbusa atrašanās vietas sekcijas vads bcd sadalās divās daļās: bc ar R_1 – vada pretestība no sekcijas sākuma līdz trolejbusa pieslēguma punktam x (vai c); cd ar R_1' – vada pretestība no punkta x (vai c) līdz sekcijas beigu punktam d . Punktā e strāva sadalās divās daļās: I_a plūst uz punktu b , kur tā summējas ar $I_d/2$, rezultātā iegūstot strāvu I_1 , kas plūst uz piedziņu pa īsāko ceļu; I_2 apiet “papildus līkumu”, līdz nonāk punktā c , kur strāvu I_1 un I_2 summa rezultējas ar piedziņas strāvu I_d – tādu pašu, kāda sākotnēji ņemta no apakšstacijas. I_1 un I_2 sadalījums jebkurā gadījumā atbilst Pirmajam Kirhoha likumam kā arī balstās faktā par vienādiem spriegumiem paralēlslēgumā, t.i. spriegums uz rezistora R_1 vienmēr vienāds ar summāro spriegumu uz rezistoriem R_s un R_1' .



2.3. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskā shēma ar strāvas plūsmu.

2.4. attēlā parādīta 2.2. un 2.3. attēlos redzamo shēmu pakāpeniska un secīga vienkāršošana jeb ekvivalenta aizvietošana līdz vienam rezistoram R , kas atbilst kopējai pretestībai R posmā

starp trolejbusu un apakšstaciju. Turpmāk tiks parādīts R aprēķināšanas formulas izvešanas process. Tā kā strāvas stabilizēšanas vadu pretestību tika nolemts neievērot, tos var aizvietot ar mezgliem, kā parādīts 2.4. attēla A daļā. Ja pieņem, ka trolejbuss pārvietojas, tad mainās trolejbusa atrašanās vietas sekcijas attiecīgās pretestības R_1 , R_1' un R_s , tāpēc to simbolizējošie rezistori parādīti ar bultiņām kā mainīgas pretestības.

Vispirms, izvedīsim trolejbusa atrašanās vietas sekcijas pozitīvās polaritātes vadu paralēlā slēguma kopējās pretestības aprēķina formulu attiecībā pret trolejbusu. Tā kā 2.3. attēlā R_1 un R_1' summa ir vienāda ar R_s , tad pretestībai R_1 atbilst 2.4. izteiksme.

$$R_1 = R_s \left(\frac{x}{d} \right), \quad (2.4.)$$

kur $x \in [0; 200]$ – trolejbusa atrašanās vietas koordināte sekcijā, m,

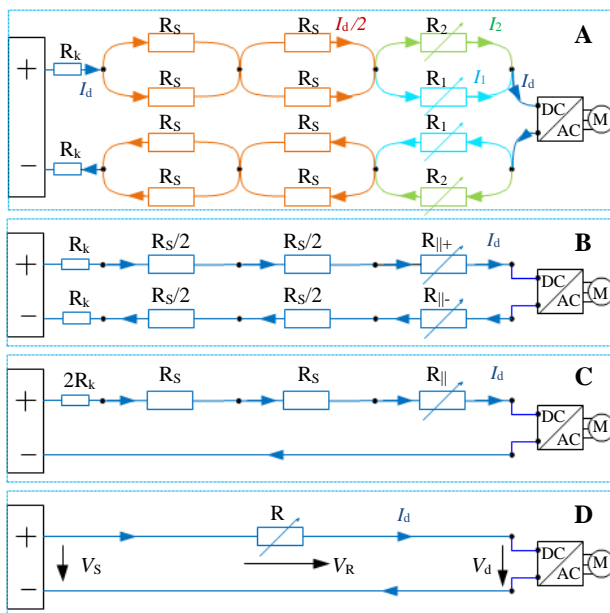
$d = 200$ m – kontakttīkla posma sekcijas, kurā atrodas trolejbuss, garums.

Savukārt pretestībai R_1' atbilst 2.5. izteiksme.

$$R_1' = R_s \left(1 - \frac{x}{d} \right). \quad (2.5.)$$

Pa ceļu, kuru plūst I_2 , kopējo pretestību R_2 aprēķina, summējot R_s un R_1' :

$$R_2 = R_s + R_s \left(1 - \frac{x}{d} \right) = R_s \left(2 - \frac{x}{d} \right). \quad (2.6.)$$

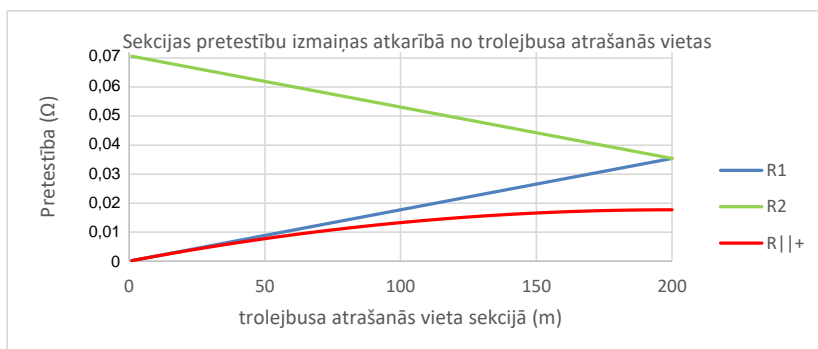


2.4. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskās shēmas ekvivalenta un pakāpeniska vienkāršošana.

R_1 un R_2 paralēlslēgumu var ekvivalenti aizvietot ar vienu rezistoru $R_{||+}$ kā parādīts 2.4. attēla B daļā. Izmantojot 2.4. un 2.6. izteiksmes, var izvest $R_{||+}$ aprēķināšanas izteiksmi:

$$R_{||+} = \frac{R_s \left(\frac{x}{d}\right) R_s \left(2 - \frac{x}{d}\right)}{R_s \left(\frac{x}{d}\right) + R_s \left(2 - \frac{x}{d}\right)} = \frac{R_s \left(\frac{x}{d}\right) \left(2 - \frac{x}{d}\right)}{2}. \quad (2.7.)$$

Pretestību R_1 un R_2 lielumi atkarībā no trolejbusa atrašanās vietas 200 m garā sekcijā redzami 2.5. attēlā. Pateicoties pretējās joslas vadam, kas pieslēgts paralēli attiecīgā trolejbusa joslas kontaktvadam, kopējā elektropārvades pretestība $R_{||+}$ ir mazāka, salīdzinot ar gadījumu bez šāda paralēlslēguma, kad atbilstošā pretestība būtu R_1 . Atšķirībā no atsevišķajām lineāri mainīgajām R_1 un R_2 pretestībām, paralēlslēguma pretestības $R_{||+}$ izmaiņas līkne nav lineāra, bet nedaudz ieliekta.



2.5. att. Gaisvadu kontakttīkla vienas sekcijas pozitīvās polaritātes vadu paralēlslēguma pretestības izmaiņa atkarībā no trolejbusa atrašanās vietas.

Negatīvās polaritātes vada pretestību paralēlslēguma $R_{||-}$ aprēķinam atbilst tā pati 2.7. izteiksme, jo, vadoties pēc 2.3. un 2.4. attēliem, negatīvās polaritātes vada pretestība ir tāda pati kā pozitīvās polaritātes vadam. Tā kā 2.4. attēla B daļā esošos pozitīvās polaritātes un negatīvās polaritātes vadus var uzskatīt par virknes slēgumu, tad negatīvās polaritātes vadu pretestības var ekvivalenti pārnest uz pozitīvās polaritātes vadu kā parādīts C daļā. Tātad trolejbusa atrašanās vietas sekcijas kopējās elektropārvades pretestībai attiecībā pret trolejbusa atrašanās vietu x atbilst izteiksme:

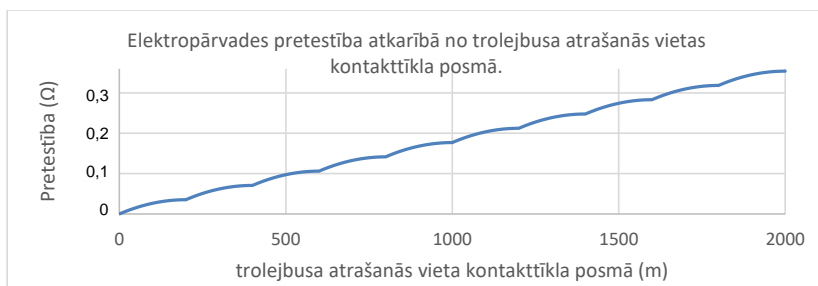
$$R_{||} = R_s \left(\frac{x}{d}\right) \left(2 - \frac{x}{d}\right). \quad (2.8.)$$

Kā parādīts 2.4. attēla D daļā, visus atlikušos vadu pretestību simbolizējošos rezistorus var ekvivalenti aizvietot ar vienu rezistoru R , kas simbolizē kopējo kontakttīkla elektropārvades pretestību attiecībā pret trolejbusu, ieskaitot pievades kabeļu pretestību $2R_k$ un starp apakšstaciju un trolejbusa atrašanās vietas sekcijas esošo sekciju gaisvadu pretestības R_s . Tāpēc pilno pretestību R var aprēķināt 2.9. formulas.

$$R = 2R_k + aR_s + R_s \left(\frac{x}{d}\right) \left(2 - \frac{x}{d}\right) = 2R_k + R_s \left(a + \left(\frac{x}{d}\right) \left(2 - \frac{x}{d}\right)\right), \quad (2.9.)$$

kur a – koeficients, kas apzīmē sekciju skaitu, kas atrodas pirms sekcijas, kurā atrodas trolejbuss.

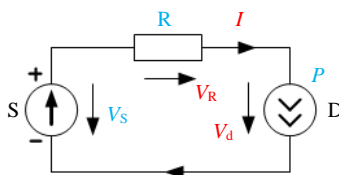
2.6. attēlā redzama pretestības R izmaiņas līkne, kas aprēķināta ar 2.8. formulu atkarībā no trolejbusa atrašanās vietas 2 km garā kontakttīkla posmā. Var redzēt, kā pretestība pieaug pa atsevišķām sekcijām. Konkrētajā gadījumā pieņemts, ka apakšstacija atrodas ļoti tuvu kontakttīklam, tāpēc pievades kabeļu pretestība R_k nav ņemta vērā, savukārt pretējā gadījumā visa 2.6. attēlā redzamā līkne pavirzītos uz augšu par noteiktu apjomu, kas vienāds ar R_k .



2.6. att. Gaisvadu kontakttīkla posma elektropārvades pretestība starp apakšstaciju un trolejbusa atrašanās vietu.

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

Situāciju, kurā ir tikai viens patērētājs, var attēlot 2.7. attēlā parādītās elektriskās ķēdes veidā, kas būtībā ir līdzīga iepriekš 2.4. attēlā redzamās D daļas shēmai, ja pieņem, ka strāvas avots D (2.7. att.) ir elektriskās enerģijas patērētājs jeb trolejbuss, rezistors R – elektropārvades pretestība, sprieguma avots S – barošanas apakšstacija. Turpmāk tiks pieņemts, ka patērētājs ir trolejbuss, kuram jaudu attiecīgajā momentā ir $P = 200$ kW, sprieguma avots ir apakšstacija ar spriegumu $V_S = 600$ V, rezistors ir gaisvadu kontakttīkla kopējā elektropārvades pretestība posmā starp apakšstaciju un trolejbusu vienāda ar $R = 0,2$ Ω, un 2.7. attēlā šie parametri ir attēloti kā zināmi zaļā krāsā, savukārt nezināmie parametri – sprieguma kritums līnijā V_R , patērētāja jeb trolejbusa spriegums V_d un plūstošā strāva I – attēloti sarkanā krāsā.



2.7. att. Elektriskā ķēde ar sprieguma avotu, patērētāju un pārvades pretestību simbolizējošu rezistoru.

Ja kādā konkrētā situācijā, kas var arī nebūt saistīta ar trolejbusa kustību, bet kuras shēma principā atbilst 2.7. attēlā parādītajai, tiek nodefīnēts, piemēram, maksimāli pieļaujamais sprieguma kritums līnijā V_R , tad attiecīgo maksimāli pieļaujamo pārvades pretestību R var elementāri aprēķināt pēc Oma likuma, ja zināms sprieguma avota spriegums V_S un patērētāja

jauda P , no kuras var aprēķināt attiecīgo strāvu I . Taču gadījumos, kas maksimāli pieļaujamais sprieguma kritums līnijā nav stingri noteikts, un arī gadījumos, kad tiek izvēlēti konkrēti vadi ar pretestību R , pie kuras sprieguma kritums V_R var būt sagaidāms arī augstāks par maksimāli pieļaujamo, tomēr var rasties nepieciešamība noskaidrot faktisko sprieguma kritumu V_R , kāds ir sagaidāms pie attiecīgas pretestības R un patērētāja jaudas P , lai varētu aprēķināt, piemēram, paredzamos elektropārvades zudumus.

2.2.1. Matemātiskais aprēķins ar kvadrātvienādojumu izvedumu

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

dots: $P = 200 \text{ kW}$; $V_S = 600 \text{ V}$; $R = 0,2 \Omega$;

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 Kirhoha likumu.

$$\begin{cases} P = IV_d \\ V_R = IR \\ V_S = V_R + V_d \end{cases} \quad (2.10.)$$

Tā kā 2.10. vienādojumu sistēma ietver trīs vienādojumus un trīs nezināmos, tad matemātiski tai ir atrisinājums, taču risināšanas gaitā tiek izvesti kvadrātvienādojumi, nevis elementāras pirmās pakāpes izteiksmes. No 2.10. vienādojumu sistēmas var izvest kvadrātvienādojumu strāvas I aprēķinam:

$$RI^2 - V_S I + P = 0. \quad (2.11.)$$

2.11. kvadrātvienādojuma atrisinājuma saknes ir:

$$I = \frac{V_S \pm \sqrt{V_S^2 - 4RP}}{2R}. \quad (2.12.)$$

No 2.10. sistēmas var izvest kvadrātvienādojumu arī sprieguma krituma V_R aprēķinam:

$$V_R^2 - V_S V_R + RP = 0. \quad (2.13.)$$

2.13. kvadrātvienādojuma atrisinājuma saknes ir:

$$V_R = \frac{V_S \pm \sqrt{V_S^2 - 4RP}}{2}. \quad (2.14.)$$

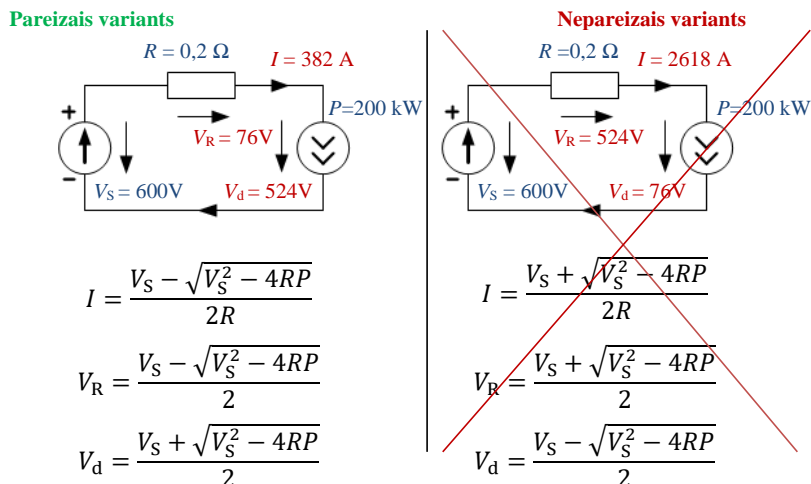
No 2.10. sistēmas var izvest kvadrātvienādojumu arī patērētāja spriegums V_d aprēķinam:

$$V_d^2 - V_S V_d + RP = 0. \quad (2.15.)$$

2.15. kvadrātvienādojuma atrisinājuma saknes ir:

$$V_d = \frac{V_S \pm \sqrt{V_S^2 - 4RP}}{2}. \quad (2.16.)$$

Tā kā no 2.10. vienādojumu sistēmas tiek izvesti kvadrātvienādojumi, tad katram no attiecīgajiem 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 vienādojumu sistēma ir spēkā, un kā par piemēru 2.8. attēlā parādīti divi elektriskās ķēdes varianti, pie kuriem ir spēkā aplūkotā 2.10. vienādojumu sistēma. Zem katras no shēmām ir uzrakstītas atbilstošās atrisinājumu saknes, savukārt aprēķinātās skaitliskās vērtības ir norādītas pie attiecīgajiem parametriem elektriskajās ķēdēs.



2.8. att. Divi elektrisko ķēžu varianti, pie kuriem ir spēkā 2.10. vienādojumu sistēma.

2.8. attēla var redzēt, ka “nepareizajā” variantā V_R un V_d , salīdzinot ar “pareizo” variantu, ir samainīti vietām, tāpēc arī strāva I iznāk tik augsta. Šāda veida uzdevumā pareizās parametru atrisinājumu saknes jāizsecina pēc loģiskiem apsvērumiem. Piemēram, sprieguma krituma vērtība nevar būt augstāka par patērētāja spriegumu, tāpēc 2.14. izteiksmes pareizā sakne ir ar mīnusa zīmi pirms kvadrātsaknes, un 2.16. izteiksmes pareizā sakne ir ar plusa zīmi pirms kvadrātsaknes. Savukārt 2618 A strāva ir pārāk augsta trolejbusa piedziņas strāvai, tāpēc 2.12. izteiksmes pareizā sakne ir ar mīnusa zīmi pirms kvadrātsaknes. Lai arī uzdevuma risināšanas gaita balstās elementārajā matemātikā, tomēr rezultātā iegūtie vairāki risinājuma varianti var radīt zināmu apmulsumu, tāpēc kādu no iepriekš pieminētajiem apgalvojumiem ir ieteicams pievienot kā piebildi attiecīgā uzdevuma nosacījuma aprakstā, ja šāda veida uzdevumu nolemj dot rēķināt studentiem ar elektrotehnikas nozari saistītos mācību priekšmetos. Izvestos kvadrātvienādojumus un to sakņu formulas nevar saukt par vispārināmām fizikas vai elektrisko ķēžu aprēķināšanas formulām, taču bez to izvešanas nevar rakstiski izrēķināt konkrēto uzdevumu. Faktiski pilnīgi pietiek izvest tikai viena parametra kvadrātvienādojumu un atrisināt tā sakni, jo atlikušos divus parametrus var aprēķināt ar attiecīgajām formulām, kā redzams zemāk 2.2. tabulā.

Elektriskās ķēdes parametru aprēķins.

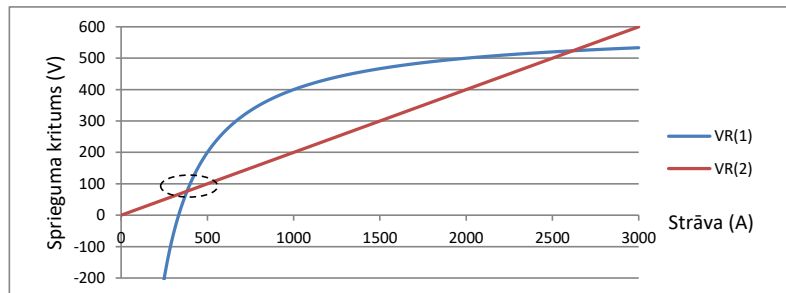
	Parametrs, kas tiek aprēķināts ar kvadrātvienādojuma sakni:		Atlikušie parametri, kas tiek aprēķināti ar vispārīgām formulām:
1. variants	$I = \frac{V_S - \sqrt{V_S^2 - 4RP}}{2R}$	\Rightarrow	$V_R = IR ; \quad V_d = V_S - V_R$
2. variants	$V_R = \frac{V_S - \sqrt{V_S^2 - 4RP}}{2}$	\Rightarrow	$I = \frac{V_R}{R}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

2.2.2. Grafiskais aprēķins

Pastāv iespēja iepriekš minēto uzdevumu ar 2.10. vienādojumu sistēmu atrisināt arī grafiski, pārveidojot sistēmu tā, lai tajā būtu divi nezināmie – V_R un I – iegūstot divas V_R izteiksmes, kuras var attēlot grafiski kā funkciju no uz x ass atliktajām I vērtībām:

$$\begin{cases} V_R = V_S - \frac{P}{I} \\ V_R = IR \end{cases} \quad (2.17.)$$

2.17. sistēmas atrisinājumi 2.9. attēlā ir atrodami tajos punktos, kuros abas ass krustojas. Krustošanās punktā nolasa attiecīgo I un V_R , turklāt pareizie atrisinājumi ir tajā zemākajā krustošanās punktā, un rezultāti ir tādi paši kā iepriekš aprēķinātie no kvadrātvienādojumiem.



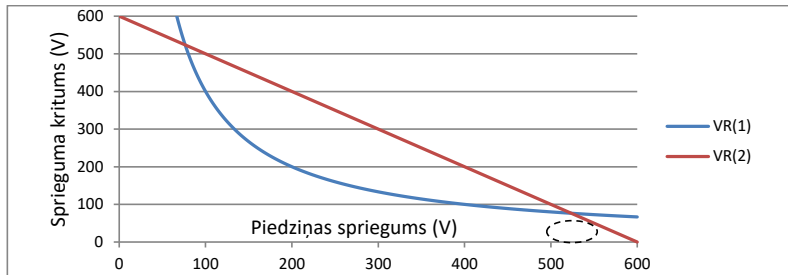
2.9. att. Strāvas un sprieguma krituma grafisks aprēķins.

Līdzīgi 2.10. vienādojumu sistēmu var pārveidot arī, iegūstot divus nezināmos – V_R un V_d – un divas V_R izteiksmes, kuras attēlo grafiski kā funkciju no uz x ass atliktajām V_d vērtībām:

$$\begin{cases} V_R = \frac{RP}{V_d} \\ V_R = V_S - V_d \end{cases} \quad (2.18.)$$

2.18. sistēmas atrisinājumi 2.10. attēlā ir nolāsāmi zemākajā krustošanās punktā. Kopumā parametru grafiskā meklēšana ir vēl viens veids, kā pārliecināties par minēto secinājumu, ka

pastāv divi ķēdes varianti, pie kuriem ir spēkā 2.10. vienādojumu sistēma. Tātad skaitliskās risināšanas gadījumā tiek iegūti kvadrātvienādojumi ar divām saknēm, savukārt grafiskās risināšanas gadījumā tiek iegūti asu krustpunkti divās vietās.



2.10. att. Sprieguma krituma un piedziņas sprieguma grafisks aprēķins.

2.2.3. Variants ar kvadrātvienādojumu izvedumu, aprēķinot zudumu kompensēšanas strāvu

Metode ir diezgan līdzīga 2.2.1. apakšnodaļā aprakstītajai, taču sniedz papildu ieskatu elektropārvades zudumu kompensēšanā ar stiprāku strāvu. Var pieņemt, ka 2.10. vienādojumu sistēmā esošā strāva I ietver divas komponentes – ideālā režīma strāvu I_{id} , kāda būtu gadījumā ar elektropārvades pretestību $R = 0 \Omega$, un papildus strāvu I_c , ar kuru tiek kompensēts sprieguma kritums V_R , tādējādi nodrošinot nepieciešamo jaudu P , t.i.:

$$I = I_{id} + I_c. \quad (2.19.)$$

Neatkarīgi no tā, vai trolejbuss atrodas tuvu apakšstacijai vai tālu no tās, nepieciešamā piedziņas jauda P konkrēta kustības ātruma nodrošināšanai saglabāsies viena un tā pati. Ja gaisvadu kontakttīkls būtu bez pārvades pretestības, tad piedziņas spriegums V_d būtu vienāds ar apakšstacijas spriegumu V_s . Līdz ar to trolejbuss piedziņa jaudu var izteikt kā:

$$P = I_{id}V_s = IV_d = (I_{id} + I_c)(V_s - V_R). \quad (2.20.)$$

Piedziņas jaudu izsakot kā I_{id} un V_s reizinājumu, var uzrakstīt divu vienādojumu sistēmu I_c un V_R aprēķinam:

$$\begin{cases} I_{id}V_s = (I_{id} + I_c)(V_s - V_R) \\ V_R = (I_{id} + I_c)R \end{cases}. \quad (2.21.)$$

No 2.21. sistēmas izvedot kvadrātvienādojumu kompensācijas strāvas I_c aprēķinam, iegūst:

$$I_c^2 R + I_c(2I_{id}R - V_s) + I_{id}^2 R = 0. \quad (2.22.)$$

Pareizā sakne ir ar mīnusa zīmi pirms kvadrātsaknes sakarā ar iepriekš 2.2.1. apakšnodaļā pieminētajiem iemesliem.

$$I_c = \frac{-2I_{id}R + V_s - \sqrt{V_s(V_s - 4I_{id}R)}}{2R}. \quad (2.23.)$$

Var izvest arī kvadrātvienādojumu sprieguma krituma V_R aprēķinam:

$$V_R^2 - V_S V_R + I_{id} V_S R = 0. \quad (2.24.)$$

Pareizā sakne ir ar mīnusa zīmi pirms kvadrātsaknes.

$$V_R = \frac{V_S - \sqrt{V_S(V_S - 4I_{id}R)}}{2}. \quad (2.25.)$$

Savukārt 2.24. vienādojuma sakne ar plusa zīmi pirms kvadrātsaknes pilnībā atbilst piedziņas spriegumam:

$$V_d = \frac{V_S + \sqrt{V_S(V_S - 4I_{id}R)}}{2}. \quad (2.26.)$$

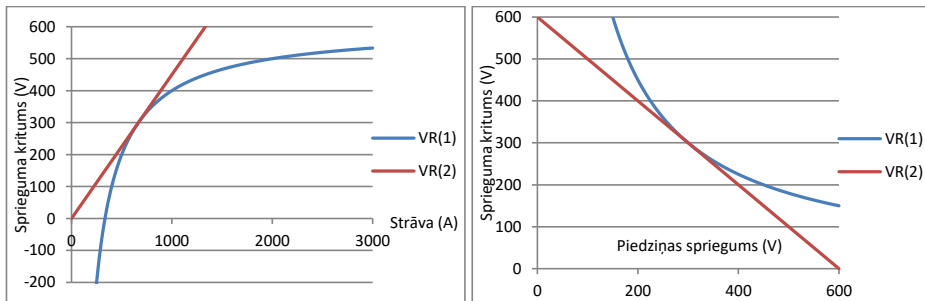
2.2.4. Aprēķins pie dažādām piedziņas jaudām un pārvades pretestībām

2.12., 2.14., 2.16. izteiksmju grupai un arī 2.22., 2.25., 2.26. izteiksmju grupai ir vienādas zemsaknes jeb diskriminantu izteiksmes. Tāpēc šīm izteiksmēm atrisinājumi pastāv tad, ja:

$$V_S^2 - 4RP \geq 0, \quad (2.27.)$$

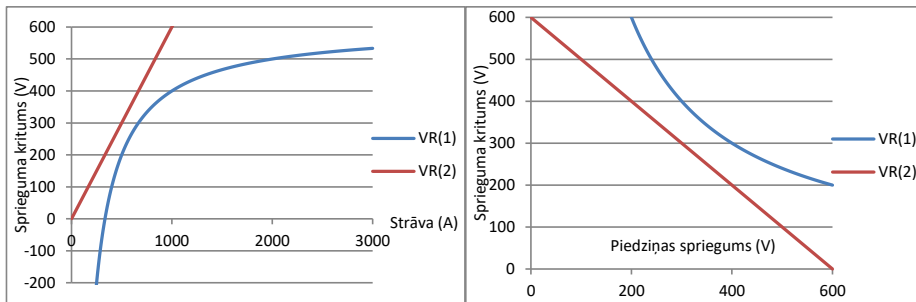
$$V_S - 4I_{id}R \geq 0. \quad (2.28.)$$

Ja augstāk minētās izteiksmes ir mazākas par nulli, tad kvadrātvienādojumu sakņu atrisinājumi iznāk kompleksi skaitļi. Tas nozīmē, ka pastāv noteikta maksimālā pretestība R , pie kuras augšminētās 2.27. un 2.28. izteiksmes ir vienādas ar nulli un katrs no spriegumiem – V_R un V_d – ir vienāds ar pusi no apakšstacijas sprieguma V_S . 2.12., 2.14. un 2.16. izteiksmju grupai pie maksimālās pretestības R būs viens atrisinājums, savukārt grafiskās risināšanas gadījumā būs viens krustošanās punkts kā redzams piemēros 2.11. attēlā.



2.11. att. Sprieguma krituma un piedziņas sprieguma grafisks aprēķins.

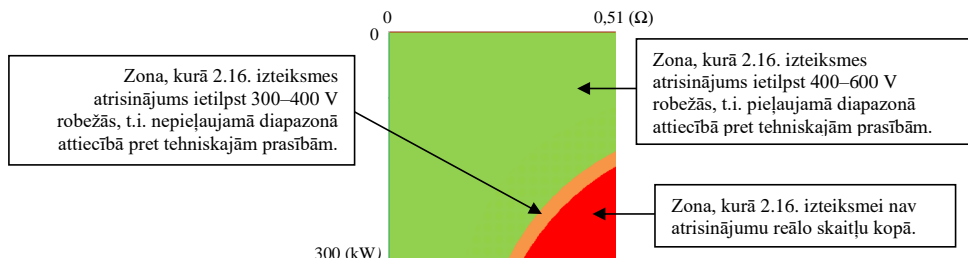
Ja maksimāli pieļaujamā pretestība R tiek pārsniegta, tad dotā ķēde nestrādās pēc plāna. Šāda nesoša atrisinājuma gadījumā kvadrātvienādojumu sakņu diskriminanti būs negatīvi, bet grafiskas risināšanas gadījumā nebūs krustošanās punktu, kā redzams piemēros 2.12. attēlā.



2.12. att. Sprieguma krituma un piedziņas sprieguma grafisks aprēķins.

Lai arī trolejbusa 27Tr vilces piedziņas nominālā jauda ir 260 kW, tomēr var pieņemt, ka atsevišķos brīžos, piemēram, strauja paātrinājuma beigu posmā jauda var sasniegt arī 300 kW. Tāpēc pieņemsim, ka piedziņas jauda P_d var mainīties no 0–300 kW, un pārvades pretestība R var mainīties no 0–0,51 Ω , turklāt maksimālajai pretestībai atbilst aptuveni 3 km attālums no apakšstacijas līdz trolejbusam. Sākumā piedziņas spriegumu V_d ir optimāli rēķināt arī tāpēc, ka pastāv arī minimālā vērtība, līdz kādai V_d var nokristies, kas piedziņai parasti ir 400 V. Tas nozīmē, ka sprieguma kritums V_R nedrīkst būt augstāks par 200 V. Ja piedziņas spriegums nokristos no 600 V uz 400 V, tad nostrādātu vilces invertora un minimālā sprieguma aizsardzības sistēma, neļaujot paaugstināt strāvu un apturot turpmāku piedziņas sprieguma samazinājumu. Taču teorētiski gan no matemātikas, gan no fizikas viedokļa, minimālais piedziņas spriegums var būt 300 V jeb puse no apakšstacijas sprieguma, kā izsecināts iepriekš.

Paskatīsimies, kas iznāk, ja veic piedziņas sprieguma V_d aprēķinu pēc 2.16. izteiksmes (ar + zīmi) vai 2.26. izteiksmes pie iepriekš minētajām P (0–300 kW) un R (0–0,51 Ω) kombinācijām. Ja P un R vērtību asis katru sadala 300 daļās, tad var iegūt rezultātu tabulu jeb matricu ar 90 000 šūnām, kuras ietver attiecīgos rezultātus, un 2.13. attēlā parādīts ar programmas *MS Excel* palīdzību iegūtas rezultātu tabulas samazināts attēls ar attiecīgi iekrāsotām šūnām jeb zonām, no kurām zaļā un oranžā ietver matemātiski un fizikāli iespējamās parametru kombinācijas, bet sarkano zonu ar kompleksu skaitļu rezultātiem var uzskatīt par nedefinētu apgabalu, kas ietver neiespējamās parametru kombinācijas.



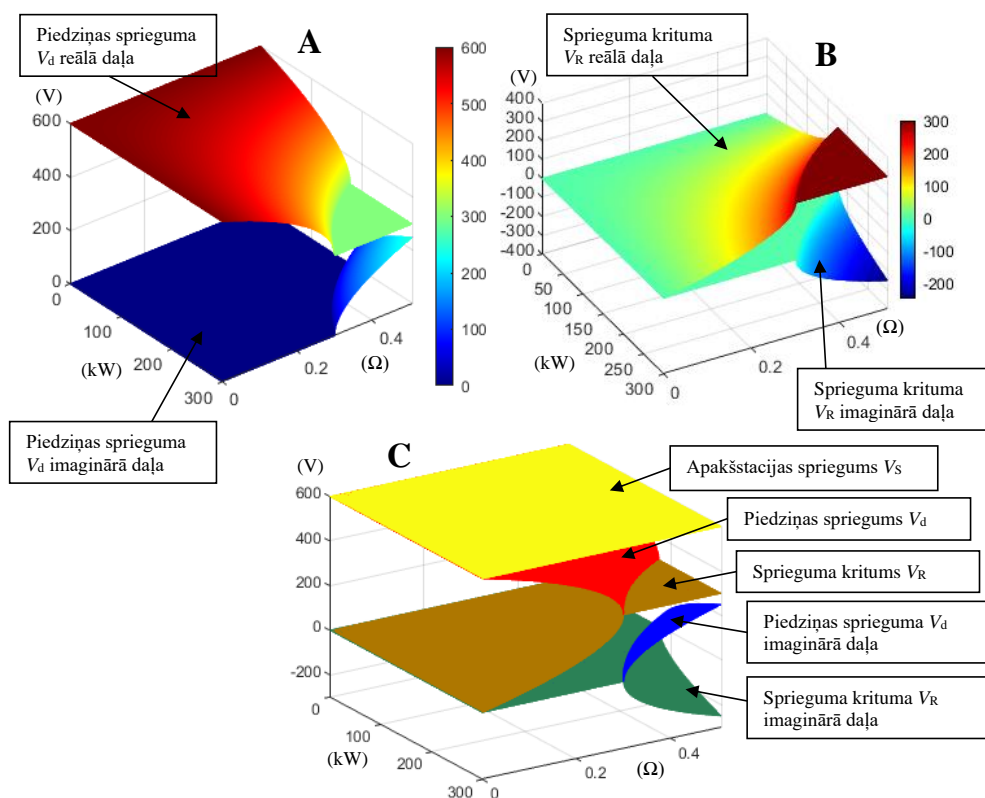
2.13. att. Piedziņas sprieguma V_d vērtību tabula atkarībā no R un P .

Piedziņas spriegumu V_d var attēlot arī 3D virsmas veidā kā funkciju no diviem parametriem -piedziņas jaudas P un pārvades pretestības R - kā parādīts 2.14. attēlā A., attēlojot vienā telpā gan atrisinājumu rezultātu reālās, gan imaginārās daļas. Ja 2.16. un/vai 2.26. izteiksmei eksistē

atrisinājums reālo skaitļu kopā, tad imaginārā daļa ir vienāda ar nulli, taču līdz ko V_d nokrītas līdz minimāli pieļaujamiem/iespējamiem 300 V, tā imaginārā daļa attiecīgi palielinās ar katru nākamo P un R , bet 300 V reālā daļa paliek nemainīga. Tāpēc atrisinājumu reālo un imagināro daļu virsmas atgādina aizvērtu putna knābi.

Kā redzams 2.14. attēlā B, sprieguma krituma V_R nedefinētajā zonā arī reālā daļa ir vienāda ar 300 V, bet imaginārā daļa ir negatīva, jo 2.14. un/vai 2.25. izteiksmei ir mīnusa zīme pirms kvadrātsaknes. Līdz ar to atrisinājumu reālo un imagināro daļu virsmas atgādina atvērtu putna knābi.

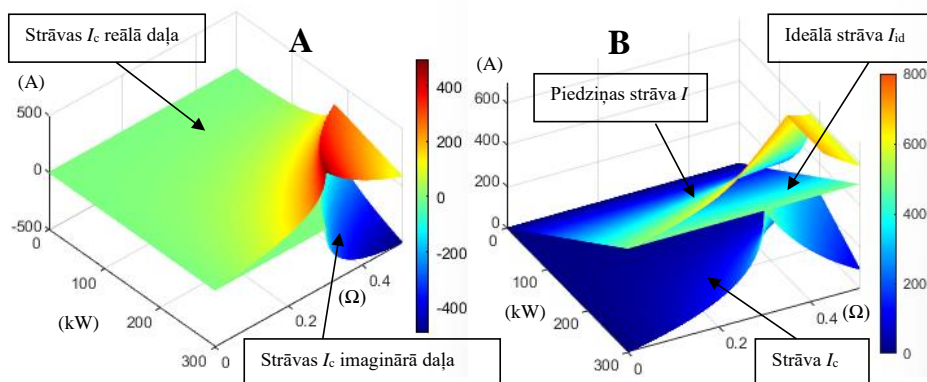
Piedziņas sprieguma V_d un sprieguma krituma V_R summai visu laiku jābūt vienādi ar apakšstacijas spriegumu $V_S = 600$ V, kā parādīts 2.13. attēlā C, kur vienā telpā parādītas visu spriegumu atbilstošās virsmas – V_d , V_R un V_S . Turklāt V_d un V_R imagināro daļu summa ir vienāda ar nulli.



2.14. att. V_d , V_R un V_S 3D vērtību virsmas atkarībā no R un P .

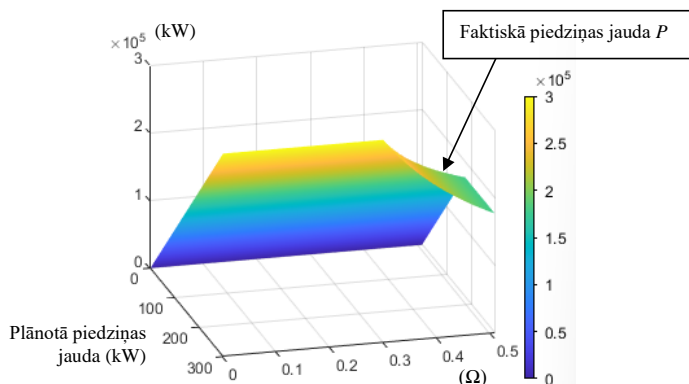
Ja veic I_c aprēķinu ar 2.23. izteiksmi tām pašām P un R kombinācijām, var pārliecināties ka nedefinētais atrisinājumu apgabals ir tajās pašās robežās kā pie V_d un V_R . Samazinoties piedziņas spriegumam V_d , arvien vairāk jāpalielina strāva I_c , lai saglabātos prasītā jauda P . Izteikts strāvas pieaugums, protams, rada arī papildus V_d samazinājumu. Attēlojot vienā telpā ideālās strāvas I_{id} un kompensēšanas strāvas I_c virsmas kā 2.15. attēlā B, var pārliecināties, ka

abu minēto strāvu summa veido pilno piedziņas strāvu I . Līdzko I_c virsma pietuvojas I_{id} virsmai, tad tā arī ir galējā robeža jeb I_c maksimāla strāva. Tātad I_c nevar būt lielāka par I_{id} . Pēc tam 2.23. izteiksmei atrisinājums ir vienīgi komplekso skaitļu kopā, bet atrisinājuma reālajai daļai ir tendence samazināties līdzīgi kā imaginārai daļai, kā redzams 2.15. attēlā A. Var izsecināt, ka I_c nedefinētajā apgabalā atrisinājuma reālā daļa atbilst maksimālajai strāvas vērtībai, kāda iespējama pie attiecīgās R un kuru summējot ar I_{id} tiek iegūta maksimāli iespējamā piedziņas strāva I , kuru reizinot ar R , tiek iegūta maksimālā $V_R = 300$ V vērtība.



2.15. att. Strāvu I_{id} , I_c un I vērtību virsmas atkarībā no R un P .

Reizinot piedziņas sprieguma V_d reālās daļa ar strāvas I reālajām daļām, tiek aprēķināta piedziņas jauda P , kuras 3D virsma parādīta 2.16. attēlā iepriekš iegūtajās V_d un I atrisinājumu nedefinētajās zonās šī jaudas virsma norāda maksimālo iespējamo jaudu pie attiecīgās pretestības R pie nosacījuma, ka $V_d = V_R = 300$ V. Redzams, ka šajos gadījumos pie lielākām R šī jauda P samazinās vēl vairāk, t.i. – nevar tikt nodrošinātas iepriekš plānotā jauda P , tāpēc arī jaudas vērtību virsmā ir attiecīgais lūzums.



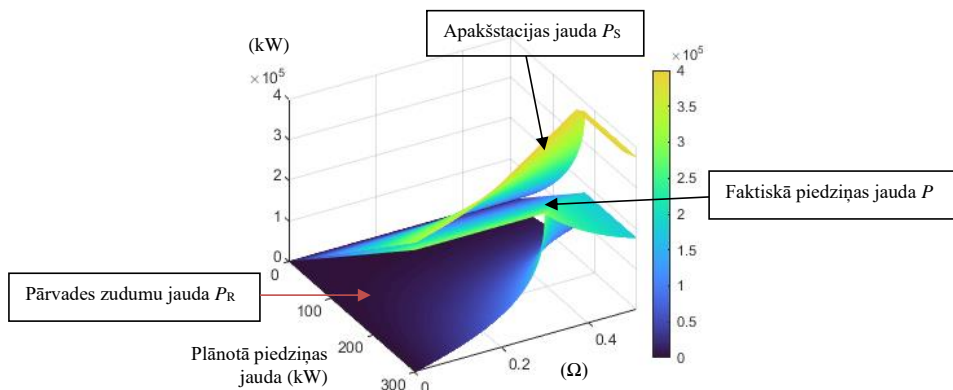
2.16. att. Piedziņas jaudas P vērtību virsma atkarībā no R un plānotās piedziņas jaudas P .

Vienā telpā 3D virsmu veidā līdzās piedziņas jaudai P var attēlot arī pārvadē zaudēto jaudu P_R , ko aprēķina kā I un R reizinājumu. Apakšstacijas jaudu var aprēķināt kā P un P_R summu, reizinātu ar noteiktu koeficientu k , kas saistīts ar apakšstacijas, taisngrieža un piedziņas

invertora zudumu kompensēšanu. Ja pieņem, ka katrai no iekārtām - apakšstacijas transformatoram, taisngriežim un piedziņas invertoram – lietderība ir 98 %, tad attiecīgais koeficients $k = 1,063$ apakšstacijas jaudas aprēķina izteiksmē:

$$P_S = k(P + P_R) = k(IV_d + I^2R) = kI(V_d + IR). \quad (2.29.)$$

Jaudu P , P_R un P_S 3D virsmas vienā telpā redzamas zemāk 2.17. attēlā. Var redzēt, ka tā saucamajā nedefinētājā zonā zudumu jauda P_R ir vienāda ar piedziņas jaudu P . Tātad zudumu jauda nekad nevar būt lielāka par patērētāja jeb piedziņas jaudu.



2.17. att. P , P_R un P_S vērtību virsmas atkarībā no R un plānotās P .

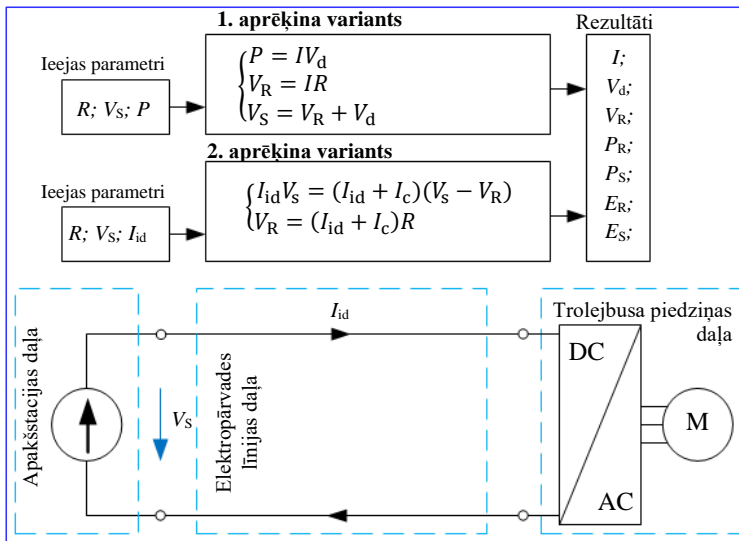
Aplūkojot jebkuru atsevišķu rezultātu no 2.13. attēla sarkanās zonas, var definēt, ka pie attiecīgās pretestības R vilces piedziņa nevar attīstīt konkrēto jaudu P , jo šāda jaudas vērtība ir pretrunā fizikas un elektrotehnikas pamatiem, t.i. Oma un Otrā Kirhofa likumam. Vēl var definēt šādi – pie attiecīgās pretestības R neeksistē tāda strāva un spriegums, kurus sareizinot var iegūt plānoto jaudu P . Realitātē faktiskā jauda sarkanajā zonā būs mazāka par plānoto jaudu. Pie šīs faktiskās jaudas spriegumi $V_d = V_R = 300V$ un šādā situācijā piedziņa lielāku jaudu par uz to brīdi esošo neattīstīs, pat ja arī būs pieprasījums palielināt jaudu.

2.3. Elektropārvades zudumu modelēšanas varianti

Tiks aprakstīti trīs dažādi veidi, kā modelēt elektropārvades zudumus viena trolejbusa kustības simulācijas laikā – modelis ar elektrisko parametru matemātisku aprēķinu, modelis ar rezistoru apakšsistēmu pārvades pretestības imitēšanai, modelis ar rezistoram ekvivalentu sprieguma avotu pārvades pretestības imitēšanai. Visus modeļus vieno tas, ka pārvades pretestība R simulācijas laikā pastāvīgi tiek aprēķināta ar 2.9. formulu.

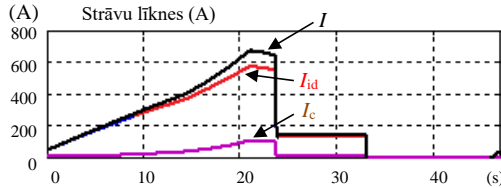
2.3.1. Elektropārvades zudumu modelēšana ar elektrisko parametru matemātisku aprēķinu

Modelis ietver elektrisko ķēdi bez rezistora, kas imitētu elektropārvades zudumus, kā redzams 2.18. attēlā. Modeļa blokshēma visu laiku strādā ideālā bezzudumu režīmā, kur plūstošā strāva ir vienāda ar ideālā režīma strāvu 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 piedziņas strāva I , sprieguma kritums V_R , piedziņas spriegums V_d , zudumu jauda P_R , apakšstacijas jauda P_s , pārvadē zaudētā enerģija E_R un pilnā apakšstacijas enerģija E_s . Nezināmie parametri – I , V_R un V_d – tiek aprēķināti saskaņā ar 2.2.1 un/vai 2.2.3 apakšnodaļās aprakstīto teoriju. Pārvades pretestība R simulācijas laikā pastāvīgi tiek aprēķināta pēc 2.9. formulas un tiek attiecīgi izmantota iepriekš minēto parametru aprēķinā, un pastāv divi varianti, kā tos aprēķināt: reāllaikā mērīt piedziņas jaudu P , kuru izmantot, lai veiktu aprēķinus saskaņā ar 2.2.1 apakšnodaļas aprakstu; reāllaikā mērīt piedziņas ideālā režīma strāvu I_{id} , kuru izmantot, lai veiktu aprēķinus saskaņā ar 2.2.3 apakšnodaļas aprakstu. Zemāk 2.18. att. parādīti abu aprēķinu variantu bloki: 1. aprēķina varianta gadījumā par ieejas parametriem kalpo R , V_s un P ; 2. aprēķina variantā – R ; V_s ; I_{id} . Var brīvi izvēlēties, kuru aprēķina variantu lietot attiecīgajā situācijā, bet abu variantu gadījumos rezultējošajiem parametriem jābūt vienādiem.



2.18. att. Trolejbussu kustības modeļa ar elektrisko parametru aprēķinu vienkāršota blokshēma.

Pirmais variants ir vieglāks apjoma ziņā, taču otrais variants ļauj apskatīt, par cik piedziņas strāva esošo zudumu dēļ ir jāpalielina. Piemērs dots 2.19. att – parādīti ar pasažieriem piepildīta 27Tr kustības simulācijas strāvu rezultāti gan bezzudumu režīmā ar I_{id} , gan zudumu režīmā ar I , pieņemot, ka trolejbussu sākotnējais attālums no apakšstacijas ir 600 m un paātrināšanās notiek līdz 50 km/h.

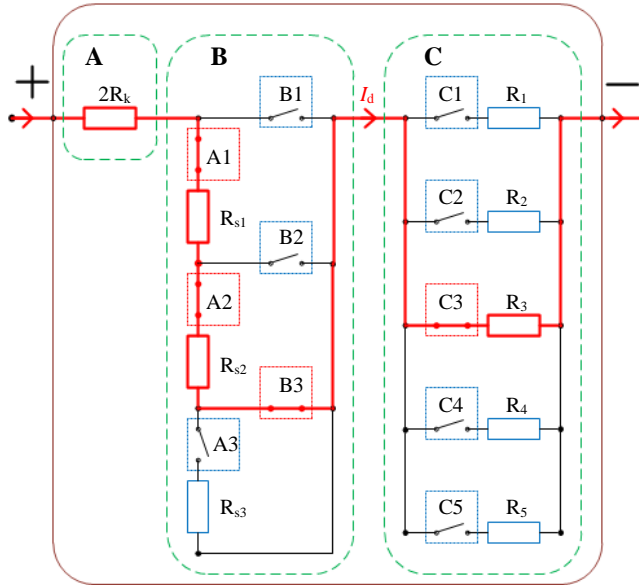


2.19. att. Piedziņas bezzudumu režīma strāvas I_{id} , zudumu kompensēšanas strāvas I_c un piedziņas faktiskās strāvas I līknes.

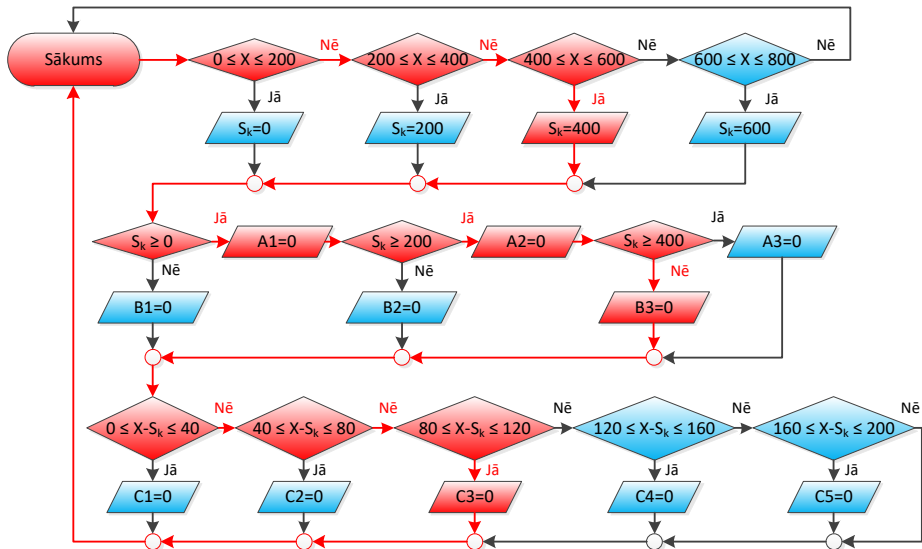
2.3.2. Elektropārvades zudumu modelēšana ar rezistoru ķēdi saturošu apakšsistēmu

2.20. attēlā redzama blokshēma elektriskā transporta gaisvadu kontakttīkla elektropārvades zudumu simulēšanas apakšsistēmai, kas ietver konstantu pretestību rezistoru ķēdi, 2.21. attēlā redzams šīs apakšsistēmas darbības algoritms. Darbība balstās tajā, ka pārvades pretestību imitējošo rezistoru ķēdi saskaņā ar trolejbusa atrašanās vietas koordināti X kontrolē slēdži, reāllaikā saslēdzot no esošajiem rezistoriem tādu ķēdi, kuras pretestība atbilst elektropārvades pretestībai posmā starp trolejbusu un apakšstaciju. 2.20. attēlā bloks A ietver apakšstacijas pievades kabeļu pretestības imitēšanas rezistoru, B bloks – rezistorus, kas atbilst kontakttīkla sekciju elektropārvades pretestībām R_{s1} , R_{s2} utt., C bloks – rezistorus, kas atbilst vienas kontakttīkla sekcijas atsevišķu daļu elektropārvades pretestībām. Tā kā vienas sekcijas garums ir 200 m, tad tas nozīmē, ka 2.20. attēlā redzamā blokshēma atbilst variantam, kur elektropārvades pretestība tiek izmainīta ik pa 40 metriem, ko trolejbuss veic kustības laikā. Tātad rezistors R_1 atbilst vidējai pretestībai sekcijas posmā 0–40 m, R_2 – posmā 40–80 m utt. C daļā rezistoru skaitu ir iespējams palielināt arī, piemēram, līdz diviem simtiem, ja tiek nolemts veikt vēl precīzākas simulācijas, kuru gaitā elektropārvades pretestība tiek izmainīta ik pa vienam metram, taču tad modelis kļūst komplicētāks ar ilgāku kompilēšanas laiku. Rezistoru shēmas slēguma mainīšanai saskaņā ar 2.21. attēlā redzamo algoritmu reāllaikā tiek iegūts parametrs S_k , kas saistīts ar trolejbusa atrašanās vietas koordināti X visā kontakttīkla posmā, un konkrētajā piemērā redzams 800 m garš kontakttīkla posms, sastāvošs no četrām 200 m garām sekcijām.

2.21. attēla algoritmiskajā shēmā ir pieminēti nosacījumi, pie kādiem attiecīgiem slēdžiem 2.20. attēlā jābūt noslēgtiem. 2.20. attēlā ar sarkanu krāsu atzīmēts strāvas plūsmas ceļš, par piemēru ņemot situāciju, kad trolejbuss atrodas 80–120 m attālumā no apakšstacijas, savukārt 2.21. attēlā ar sarkanu krāsu ir iekrāsots aprakstītās situācijas atbilstošais algoritmiskais cikls.



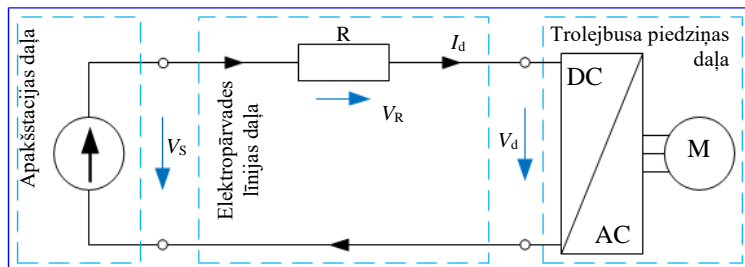
2.20. att. Rezistoru apakšsistēmas shēma.



2.21. att. Algoritms atbilstošas pretestības iestatīšanai priekš rezistoru apakšsistēmas.

2.22. attēlā redzama vienkāršota shematiska trolejbusa kustības modeļa blokshēma, kas ietver apakšsistēmu R ar līdz šim aplūkoto pārvades pretestību imitējošo rezistoru ķēdi no 2.20. attēla. Trīs modeļa pamata sastāvdaļas ir sprieguma avots ar spriegumu V_s , kas imitē barošanas apakšstaciju, pārvades līnijas pretestības imitēšanas daļa, kas iekļauj rezistoru

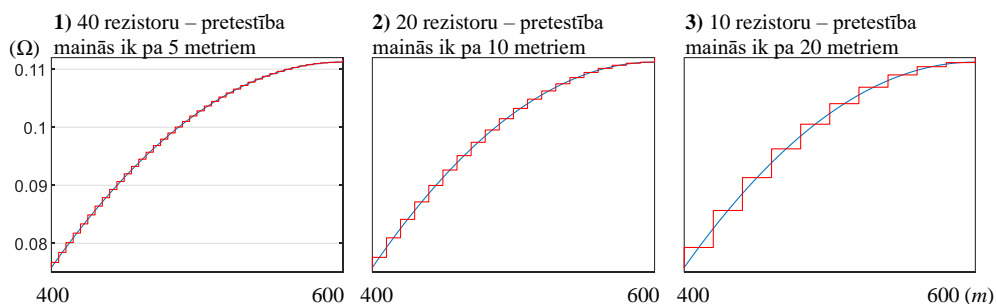
apakšsistēmu, uz kuras veidojas attiecīgais sprieguma kritums V_R , un trolejbusa piedziņas imitēšanas bloks ar attiecīgu piedziņas spriegumu V_d .



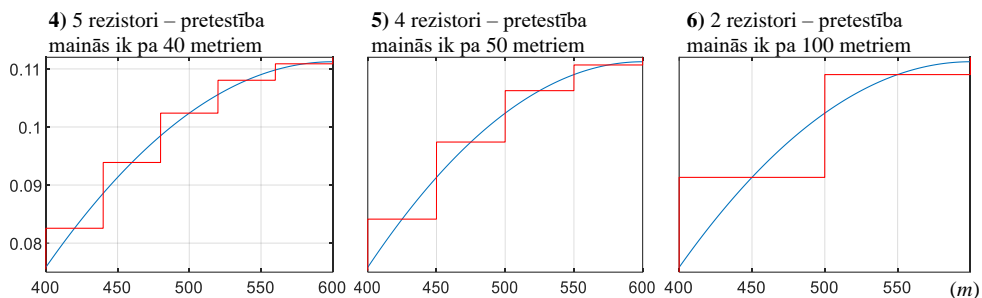
2.22. att. Trolejbusa kustības modeļa ar rezistoru apakšsistēmu vienkāršota blokhēma.

2.3.3. Pārvades zudumu simulāciju precizitāšu salīdzinājums modeļiem ar atšķirīgiem pretestības izmaiņas soļiem

Vairumā modelēšanā balstītajos pētījumos par elektriskā transporta gaisvadu kontakttīkla elektropārvades zudumiem tikuši izmantoti konstantu pretestību rezistori. Īsāks pretestības izmaiņas solis no vienas puses nozīmē precīzāku rezultātu iegūšanu, taču no otras puses tas nozīmē arī vairāk rezistoru 2.20. attēla apakšsistēmas C daļā, padarot modeli apjomīgāku un ar ilgāku kompilēšanās laiku. Tāpēc tika nolemts izpētīt, kādi ir optimāli elektropārvades izmaiņas soļi modeļiem ar rezistoru apakšsistēmu, salīdzinot atšķirības starp iepriekš aprakstīto precīzo variantu – matemātisku aprēķinu, kur elektropārvades pretestība bez aiztures mainās visā simulācijas laikā atbilstoši trolejbusa kustībai jeb veiktajam attālumam. Tika pārbaudīti 2.20. attēla C daļas rezistoru iespējamo kombināciju seši varianti, kuru rezultējošās pretestību līknes 400–600 m attālumā no apakšstacijas parādītas 2.23. un 2.24. attēlā. sarkanajās krāsās, bet zilās līknes atbilst precīzajai pretestībai. Jo vairāk rezistoru, jo rezultējošā līkne līdzīgāka precīzajai līknei, kā redzams pie 40 rezistoriem.

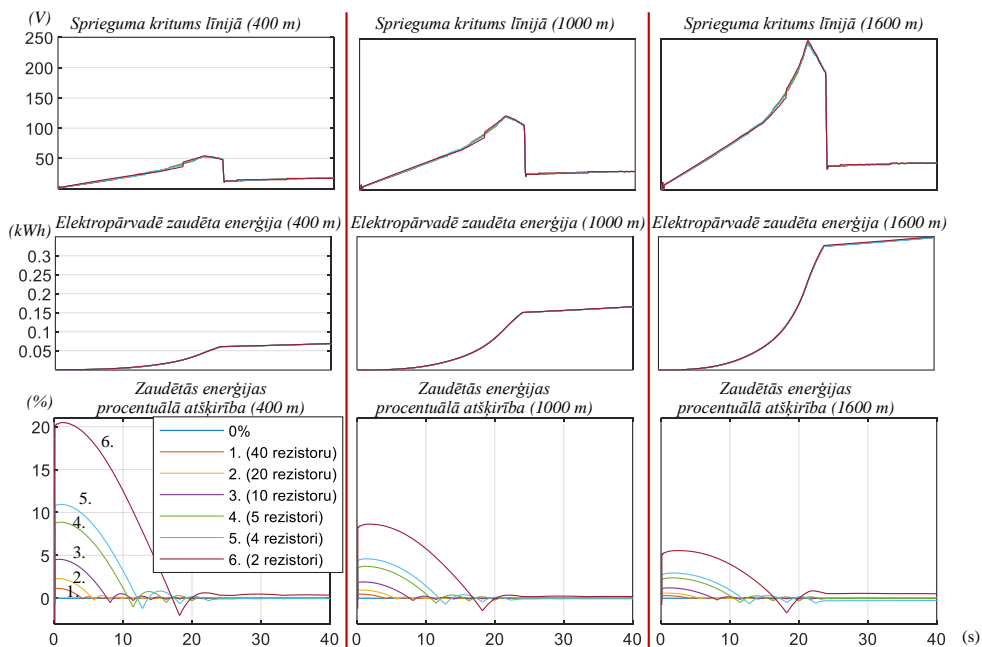


2.23. att. Elektropārvades pretestības izmaiņas varianti salīdzinājumā ar precīzo pretestību.



2.24. att. Elektropārvades pretestības izmaiņas varianti salīdzinājumā ar precīzo pretestību.

Līdz pusei ar pasažieriem piepildītam 27Tr tika veiktas trīs simulācijas pie 400 m, 600 m un 1600 m sākotnējiem attālumiem no apakšstacijas. Kustību ciklos trolejbus attālinājās no apakšstacijas, pātrinādamies līdz 50 km/h aptuveni 24 s. un pēc tam veidams vienmērīgu kustību vēl 16 s. 2.25. attēlā redzamajos simulāciju rezultātos gan līnijas sprieguma krituma, gan pārvadē zaudētās enerģijas līknes pie visiem variantiem gandrīz pārklājas. Taču procentuālās pārvades zudumu atšķirības variantiem ar augstu pretestības izmaiņas soli (jeb ar mazāku rezistoru skaitu) ir lielākas tieši kustības sākumā, it īpaši pie mazākiem sākotnējiem attālumiem no apakšstacijas. Kā galveno iemeslu tam var izsecināt pēc 2.24. attēla, jo pretestības vērtības soļu jeb pakāpienu sākumos (sarkanā krāsa) ir augstākas par precīzo pretestību (zilā krāsa), savukārt brīdī, kad viena soļa jeb pakāpiena ietvaros zilās līknes vērtības kļūst augstākas par konstanto sarkanās līknes vērtību, sākas sava veida kompensēšanās process, kura rezultātā procentuālā atšķirība sāk izlīdzināties jeb nokristies.



2.25. att. Simulāciju rezultāti pie trīs dažādiem sākotnējiem attālumiem no apakšstacijas.

Kā otru iemeslu tam, ka modeļiem ar mazāk rezistoriem atšķirības ir augstākas tieši pie mazākiem sākotnējiem attālumiem no apakšstacijas, kad trolejbusi pārvietojas gar kontakttīkla sekciju sākumiem, ir tāds, ka pie garākiem attālumiem starp apakšstaciju un trolejbusu pretestību atšķirības, kas redzamas 2.24. attēlā, veido mazāku daļu no pilnās līnijas pretestības, savukārt pie īsākiem attālumiem 2.23. attēlā redzamajām atšķirībām attiecīgi ir lielāka ietekme. Taču jebkurā gadījumā, ja trolejbuss veic kustību visas 200 m sekcijas garumā, tad zudumu atšķirība izlīdzinās, kā redzams 2.25. attēlā visos gadījumos pēc 24. sekundes jeb pie paātrināšanās beigām. Pēc procentuālo atšķirību līknēm var secināt, ka pēdējie divi varianti ar 2 un 4 rezistoriem ir paši neprecīzākie, un variants ar 5 rezistoriem ir uz precizitātes robežas. Savukārt variantu ar 10 rezistoriem, kurā pretestība izmainās ik pa 20 m, var uzskatīt par optimālu variantu kā pirmo, kura rezultāti atšķiras mazāk par 1 % no precīzā varianta.

2.3.4. Elektropārvades zudumu modelēšana ar sprieguma avota izmantošanu rezistoru apakšsistēmas vietā

Augstākās izglītības iestādēs elektrotehnikas teorētisko pamatu mācību kursā tiek mācīts par ekvivalentiem pārveidojumiem līdzstrāvas ķēdēs, un šajā gadījumā kā piemēru var minēt 2.1.1. apakšnodaļas ietvaros veiktās darbības, gaisvadu kontakttīkla pretestības slēguma shēmu pārveidojot par shēmu ar vienu rezistoru, kā redzams iepriekš 2.4. attēlā. Pārveidojums ir uzskatāms par pareizi veiktu un ekvivalentu, ja sprieguma kritums uz pārveidotās shēmas rezistora ir tāds pats kā kopējais sprieguma kritums uz nepārveidotās shēmas rezistoru slēguma, kā arī ja abās shēmās no apakšstacijas ņemtās jeb trolejbusa piedziņas strāvas ir vienādas.

Pastāv arī iespēja pasīvos elementus – rezistorus - ekvivalenti aizvietot ar aktīviem elementiem – strāvas un/vai sprieguma avotiem. Šī teorija mācību procesa īstenotajos studijuursos parasti tiek pieminēta virspusēji bez lielas iedziļināšanās, taču turpmāk tiks aprakstīts tās praktiska pielietojuma piemērs trolejbusa gaisvadu kontakttīkla sprieguma krituma simulēšanā. Konkrētajā gadījumā rezistora vietā var izmantot sprieguma avotu, kam var iestatīt tādu sprieguma vērtību, kas būtu vienāda ar sprieguma kritumu uz aizvietojamā rezistora. Tā rezultātā caur sprieguma avotu plūstošās strāvas vērtība atbilstu strāvas, kāda plūstu caur aizvietojamam rezistoram, vērtībai.

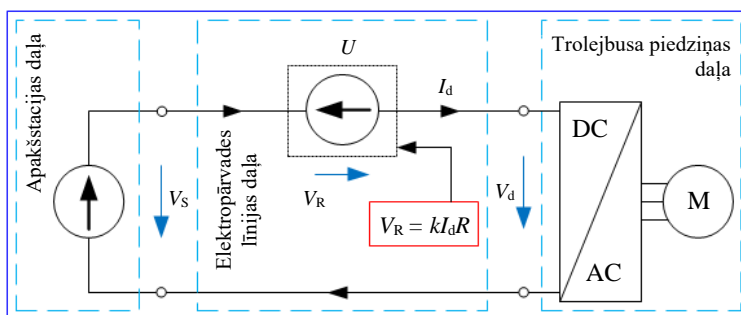
Metodes pamatideja ir tāda, ka rezistoru apakšsistēmas vietā ir sprieguma avots U , kā redzams 2.26. attēlā. Sprieguma avotam reāllaikā tiek iestatīta kontakttīkla sprieguma kritumam V_R atbilstošā vērtība. Simulācijas laikā ar strāvas mērinstrumentu tiek mērīta strāva I_d , savukārt ar 2.9. formulu tiek aprēķināta attiecīga pārvades pretestība R . Abu pieminēto parametru signālu reizinājums ir atbilstošs sprieguma krituma vērtībai, kāda attiecīgi tiek iestatīta sprieguma avotam. Gluži kā modelī ar rezistoru apakšsistēmu, arī šajā modelī sprieguma avota radītais sprieguma kritums tiek kompensēts automātiski, ņemot stiprāku strāvu I_d no apakšstaciju imitējošā sprieguma avota. Modelis visu laiku 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 sprieguma krituma aprēķina ir iespējams ņemt vērā arī trolejbusa piedziņas invertora zudumu kompensēšanu. Arī zudumi invertorā tiek kompensēti, ņemot

stiprāku strāvu no apakšstacijas, tādējādi nodrošinot prasīto jaudu invertora izejā priekš piedziņas. Ja pieņem, ka invertora lietderības koeficients ir k , tad sprieguma avotam iestatāmā sprieguma krituma aprēķināšanas formula reāllaikā ir šāda:

$$V_R = kI_d R. \quad (2.30.)$$

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



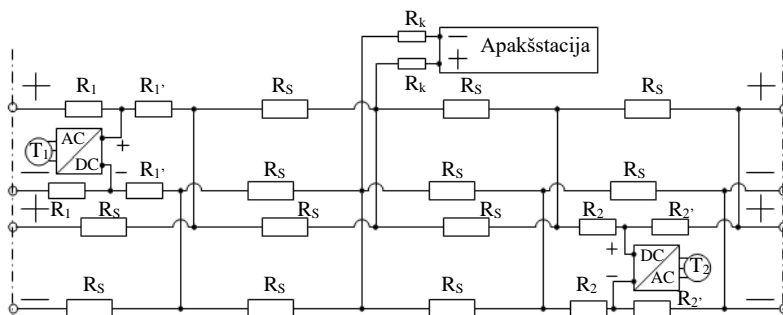
2.26. att. Vienkāršota blokshēma trolejbusa kustības modeļa ar sprieguma avotu kontakttīkla sprieguma krituma simulēšanai.

2.4. Kontakttīkla elektriskās pretestības aprēķināšana divu trolejbusu kustības gadijumā

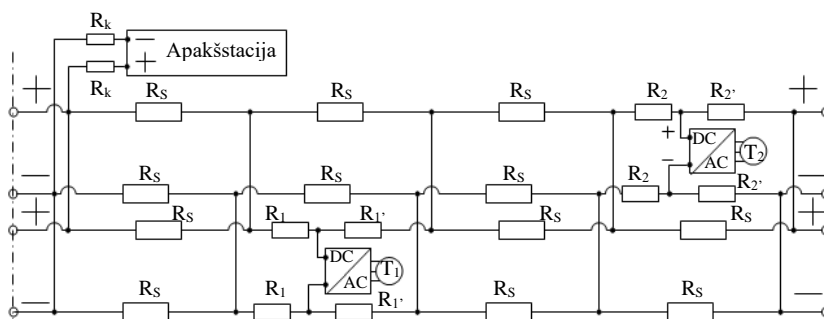
Pat ja trolejbus nav aprīkots ar mobilu EUS, kontakttīkla posmā nav pieejamu stacionāru EUS un apakšstacija nav aprīkota ar reversīvo taisngriezi, tomēr pastāv iespēja trolejbusa bremzēšanas rekuperēto jaudu novadīt uz kādu citu trolejbusu, kas atrodas tajā pašā kontakttīkla posmā attiecīgajā momentā uzņem ātrumu. Faktiski EUS neesamības gadījumā bremzējoša trolejbusa rekuperētā jauda automātiski tiek novadīta uz kontakttīklu virzienā, kur atrodas trolejbus, kas uzņem ātrumu. Taču ja konkrētajā momentā kontakttīkla posmā nav citu trolejbusu, kas jaudu patērē, tad šī rekuperētā jauda tiek izkliedēta bremžu rezistoros. Tādā veiksmīgā situācijā, kad viens trolejbus bremzē un rekuperē jaudu, bet otrs tajā pašā kontakttīkla posmā uzņem ātrumu un jaudu patērē, tad ātrumu uzņemošajam trolejbusam absorbējot bremzējoša trolejbusa rekuperēto jaudu, attiecīgi samazinās apakšstacijas jaudas apjoms. Apsverot un pētot šādu rekuperētās jaudas izmantošanas variantu, neapšaubāmi, ir jāreķinās arī ar gaisvadu elektropārvades pretestību, jo starp abiem trolejbusiem pastāv arī zināms savstarpējs attālums, kas atkarīgs no abu trolejbusu atrašanās vietām kontakttīkla posmā. Līdz ar to noteikta daļa rekuperētās jaudas tiks zaudēta elektropārvades vadu pretestības dēļ, turklāt pie lielāka trolejbusu savstarpējā attāluma būs attiecīgi lielāki elektropārvades zudumi.

2.4.1. Strāvu plūsmas gaisvadu kontakttīklā divu trolejbusu kustības gadījumā un pārvades pretestības shēmas vienkāršošana

Divu trolejbusu kustības gadījumā apakšstacijas pieslēgums pie kontakttīkla posma var atrasties starp abiem trolejbusiem, kā redzams 2.27. attēlā, vai arī kādā no kontakttīkla posma galiem, kā parādīts 2.28. att., kur abi trolejbusi atrodas vienā un tajā pašā kontakttīkla posma pusē attiecībā pret apakšstaciju. Var izdarīt secinājumu, ka 2.27. attēla situācijā trolejbusu strāvu sadalījums katram atsevišķā trolejbusam, kad abi uzņem ātrumu, būtībā ir tāds pats kā iepriekš viena trolejbusa kustības gadījumā, bet vienīgi pa apakšstacijas pievades kabeļiem ar pretestību R_k plūst abu trolejbusu strāvas. Savukārt 2.28. attēlā situācijā posmā starp apakšstaciju un tai tuvāko trolejbusu T_1 plūst abu trolejbusu – T_1 un T_2 – kopējā strāva. Tas nozīmē, ka trolejbusa T_2 strāvas dēļ kontakttīkla sprieguma kritums attiecībā pret T_1 ir augstāks nekā gadījumā, ja trolejbusa T_2 nebūtu, jo posmā starp apakšstaciju un trolejbusu T_1 strāva priekš trolejbusa T_2 faktiski ir lieka garām plūstoša strāva, kas izraisa papildu sprieguma kritumu. To pašu, protams, var teikt par trolejbusa T_1 strāvu attiecībā pret trolejbusu T_2 .



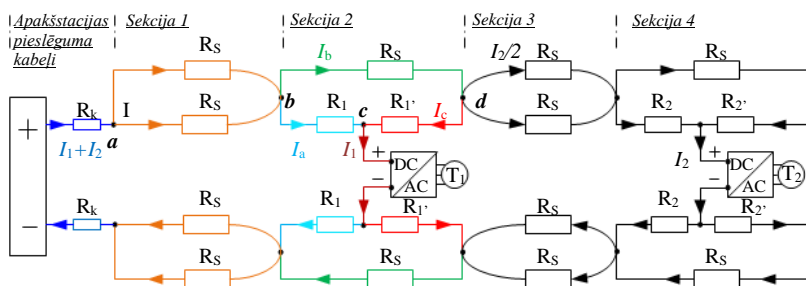
2.27. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla vienkāršota shēma ar diviem trolejbusiem un apakšstacijas pieslēgumu kontakttīkla posma vidū.



2.28. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla vienkāršota shēma ar diviem trolejbusiem un apakšstacijas pieslēgumu kontakttīkla posma galā.

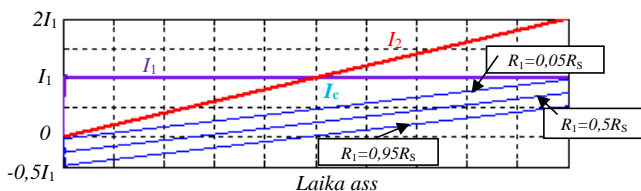
Tāpēc tika nolemts veikt padziļinātāku izpēti strāvu plūsmu sadalījumam 2.28. attēla shēmas kontakttīkla sekcijā, kurā atrodas apakšstacijai tuvāk esošais trolejbuss T_1 , jo šajā sekcijā plūst abu trolejbusu strāvas. Lai uzskatāmi attēlotu strāvu plūsmu no apakšstacijas līdz

abiem trolejbusiem gaisvadu kontakttīkla posmā, 2.28. attēlā redzamo shēmu var ekvivalenti pārveidot, attēlojot abu joslu pozitīvās polaritātes vadus augšpusē un abu joslu negatīvās polaritātes vadus – apakšpusē, kā redzams 2.29. attēlā. No apakšstacijas ņemtā strāva I_s mezglā a sadalās divās vienādās daļās, kuras plūst virzienā uz abiem trolejbusiem. Trolejbusu T_1 un T_2 atrašanās vietu sekciju vadi sadalās divās daļās ar pretestībām R_1 un R_1' , kā arī attiecīgi ar R_2 un R_2' . Trolejbusa T_1 atrašanās vietas sekcijā visos trīs posmos bc , cd un bd plūst dažādas strāvas I_a , I_b un I_c . Tālāk 3. sekcijā strāva sadalās divās vienādās daļās un plūst uz trolejbusu T_2 pēc tāda paša principa kā iepriekš viena trolejbusa kustības gadījumā, tāpēc šīs strāvas vairs nav izdalītas ar atsevišķām krāsām.



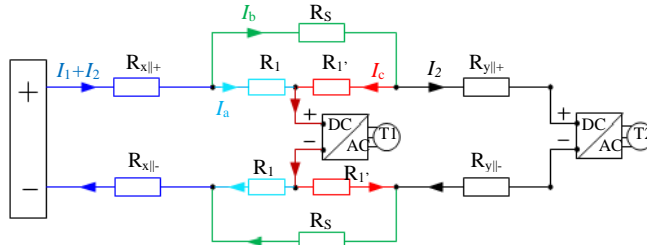
2.29. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskā shēma ar strāvu plūsmām divu trolejbusu kustības laikā.

Veicot simulācijas, tika noskaidrots, ka divu trolejbusu vienlaicīgas kustības un jaudas patērēšanas gadījumā trolejbusa T_1 atrašanās vietas sekcijas vada posmā cd strāva var plūst ne tikai virzienā uz T_1 , kā redzams 2.29. attēlā, bet arī virzienā uz T_2 . Tas ir atkarīgs no R_1 un R_1' jeb trolejbusa T_1 atrašanās vietas sekcijā, kā arī no abu trolejbusu jaudas patēriņiem konkrētajā momentā. 2.30. attēlā redzamas attiecīgās līknes situācijai, kur pieņem, ka trolejbus T_1 patērē konstantu strāvu I_1 , savukārt trolejbusam T_2 strāva I_2 lineāri mainās no nulles līdz vērtībai, kas ir divas reizes lielāka par I_1 . Strāvu I_1 un I_2 līknes ir vienādas pie jebkādām R_1 un R_1' vērtībām, taču strāva I_c posmā dc mainās atkarībā no R_1 un R_1' , tāpēc ir parādītas trīs dažādas I_c līknes pie dažādām R_1 : $R_1 = 0,05R_s$; $R_1 = 0,5R_s$ un $R_1 = 0,95R_s$. 2.30. attēlā negatīva I_c nozīmē, ka tā plūst no c uz d . Var redzēt, ka ja $I_2 > I_1$, strāva I_c vienmēr plūst virzienā no c uz d . Ja $I_2 < I_1$, I_c var plūst gan vienā, gan otrā virzienā atkarībā no R_1 un R_1' vērtībām.



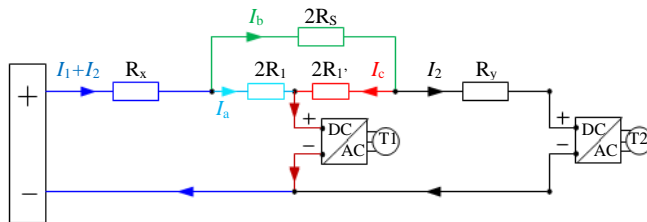
2.30. att. Piemērs trolejbusu strāvu sadalījumam, virzieniem un vērtībām, kad abi trolejbusi patērē strāvu.

Gan pozitīvās, gan negatīvās polaritātes vadu sekciju paralēlslēgumus var ekvivalenti aizvietot ar vienu rezistoru, kā redzams 2.31. attēlā, bet tā kā T_1 sekcijā notiek abu trolejbusu strāvu pārdale, rezistorus R_1 , R_1' un R_s nav iespējams ekvivalenti aizvietot ar vienu rezistoru. Minētie rezistori ir atstājami kā trīsstūra slēgums.



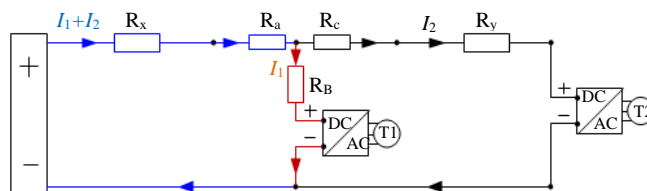
2.31. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskās shēmas ar strāvu plūsmām divu trolejbusu kustības laikā vienkāršošanas pirmais solis.

Vienīgi negatīvās polaritātes vada rezistorus R_1 , R_1' un R_s var ekvivalenti pārnest uz pozitīvās polaritātes vadu, kā redzams 2.32. attēlā, jo plūstošās strāvas, piemēram, gan caur pozitīvās, gan negatīvās polaritātes rezistoru R_1 ir vienādas, līdzīgi kā ar rezistoriem R_1' un R_s .



2.32. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskās shēmas ar strāvu plūsmām divu trolejbusu kustības laikā vienkāršošanas otrais solis.

Tālāk 2.32. attēlā redzamo R_1 , R_1' un R_s trīsstūra slēgumu var pārveidot par zvaigznes slēgumu ar jauniem rezistoriem R_a , R_b un R_c , kā redzams 2.33. attēlā.



2.33. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskās shēmas ar strāvu plūsmām divu trolejbusu kustības laikā vienkāršošanas trešais solis.

Pretestību R_a , R_b un R_c formulas ir:

$$R_a = \frac{2R_1R_s}{R_1 + R_1' + R_s} = R_s \left(\frac{x}{d} \right), \quad (2.31.)$$

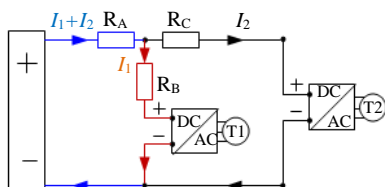
$$R_B = \frac{2R_1 R_{1'}}{R_1 + R_{1'} + R_s} = R_s \left(\frac{x}{d}\right) \left(1 - \frac{x}{d}\right), \quad (2.32.)$$

$$R_C = \frac{2R_1 R_s}{R_1 + R_{1'} + R_s} = R_s \left(1 - \frac{x}{d}\right), \quad (2.33.)$$

kur $x \in [0 \text{ līdz } 200]$ – trolejbusa T_1 atrašanās vietas koordināte sekcijā, m;

$d = 200 \text{ m}$ – kontakttīkla posma sekcijas, kurā atrodas trolejbuss T_1 , garums, m.

Pēc tam pozitīvās polaritātes vada rezistorus R_x un R_a , caur kuriem plūst abu trolejbusu strāva, var ekvivalenti aizvietot ar vienu rezistoru R_A , līdzīgi kā rezistorus R_c un R_y , caur kuriem plūst trolejbusa T_2 strāva. Rezultātā tiek iegūta shēma ar trīs rezistoriem, kā 2.34. attēlā.



2.34. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma elektriskās shēmas ar strāvu plūsmām divu trolejbusu kustības laikā vienkāršošanas pēdējais solis.

Rezistora R_A pretestības aprēķināšanas formula ir:

$$R_A = 2R_k + aR_s + R_s \left(\frac{x}{d}\right), \quad (2.34.)$$

kur a – koeficients, kas apzīmē sekciju skaitu, kas ir pirms sekcijas, kurā atrodas trolejbuss T_1 .

Rezistora R_B pretestības aprēķināšanai atbilst tā pati 2.31. formula, savukārt rezistora R_C pretestības aprēķināšanas formula ir:

$$R_C = R_s \left(\left(1 - \frac{x}{d}\right) + b - (a + 1) + \left(\frac{x'}{d}\right) \left(2 - \frac{x'}{d}\right) \right), \quad (2.35.)$$

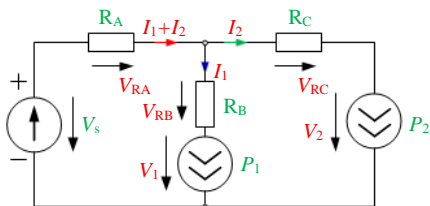
kur $x' \in [0 \text{ līdz } 200]$ – trolejbusa T_2 atrašanās vietas koordināte sekcijā, m;

b – koeficients, kas apzīmē sekciju skaitu, kas atrodas pirms sekcijas, kurā atrodas trolejbuss T_2 .

2.4.2. Gaisvadu kontakttīkla elektroapgādes ķēdes vienādojumi divu trolejbusu kustības gadījumā

Shēmu, kas redzama 2.34. attēlā, var pārveidot, aizvietojot apakšstacijas bloku ar sprieguma avotu un divus trolejbusus ar strāvas avotiem, kā tālāk redzams 2.35. attēlā, kur zināmie parametri iekrāsoti zaļā krāsā, nezināmie – sarkanā. Viena trolejbusa kustības variantā jeb 2.7. attēla shēmā nezināmos parametrus varēja aprēķināt, sastādot vienādojumu sistēmu un iegūstot kvadrātvienādojumus, no kuriem izved attiecīgās nezināmo parametru aprēķināšanas

formulas. Sastādīsim 2.35. attēlā redzamās ķēdes vienādojumu sistēmu ar sākotnējo mērķi izvest ar sarkano krāsu attēloto nezināmo parametru aprēķināšanas formulas.



2.35. att. Divvirzienu gaisvadu kontakttīkla posma ar divu trolejbusu kustību vienkāršota elektriskā shēma, kur trolejbusi aizvietoti ar ekvivalentiem strāvas avotiem.

2.36. vienādojumu sistēmas pirmā rinda atbilst ķēdes jaudu bilances vienādojumam, otrā – Otrā Kirhofa likumam ķēdes kreisās puses kontūram, trešā – Otrā Kirhofa likumam kontūram ap visu ķēdi:

$$\begin{cases} V_s(I_1 + I_2) = (I_1 + I_2)^2 R_A + I_1^2 R_B + P_1 + I_2^2 R_C + P_2 \\ V_s = (I_1 + I_2)R_A + I_1 R_B + \frac{P_1}{I_1} \\ V_s = (I_1 + I_2)R_A + I_2 R_C + \frac{P_2}{I_2} \end{cases} \quad (2.36.)$$

Atšķirībā no 2.10. vienādojumu sistēmas, mēģinājumi rakstiski atrisināt 2.36. vienādojumu sistēmu ar strāvu I_1 un I_2 izvešanu novestu pie ļoti garām ceturktās pakāpes vienādojumu izteiksmēm, kuras nevar atrisināt ar tradicionālām risināšanas metodēm, proti, nesanāks iegūt konkrētas I_1 un I_2 formulas, tāpēc šādas darbības netiks veiktas. Tas nozīmē, ka divu trolejbusu kustības gadījumā vienīgā racionālā izvēle ir reāllaika kustības modelēšana, izmantojot attiecīgos matemātiskos modeļus kā, piemēram, modeli, kas ietver trīs apakšsistēmas ar rezistoru ķēdēm vai modeli, kurš ietver trīs sprieguma avotus.

Aprakstītajā divu trolejbusu kustības gadījumā 2.22. attēla posmā R_A pilnie jaudas zudumi kontakttīklā sastāv no divām daļām – trolejbusa T_1 strāvas I_1 dēļ radušies zudumi $P_{RA(T1)}$ un trolejbusa T_2 strāvas I_2 dēļ radušies zudumi $P_{RA(T2)}$. Tāpēc zudumu jauda šinī posmā ir aprēķināma kā:

$$P_{RA} = (I_1 + I_2)^2 R_A = (I_1^2 + 2I_1 I_2 + I_2^2) R_A. \quad (2.37.)$$

Matemātiski var pārliecināties, ka pie jebkādām I_1 , I_2 un R_A vērtību kombinācijām $P_{R(T1)}$ un $P_{R(T2)}$ atbilstošās izteiksmes ir:

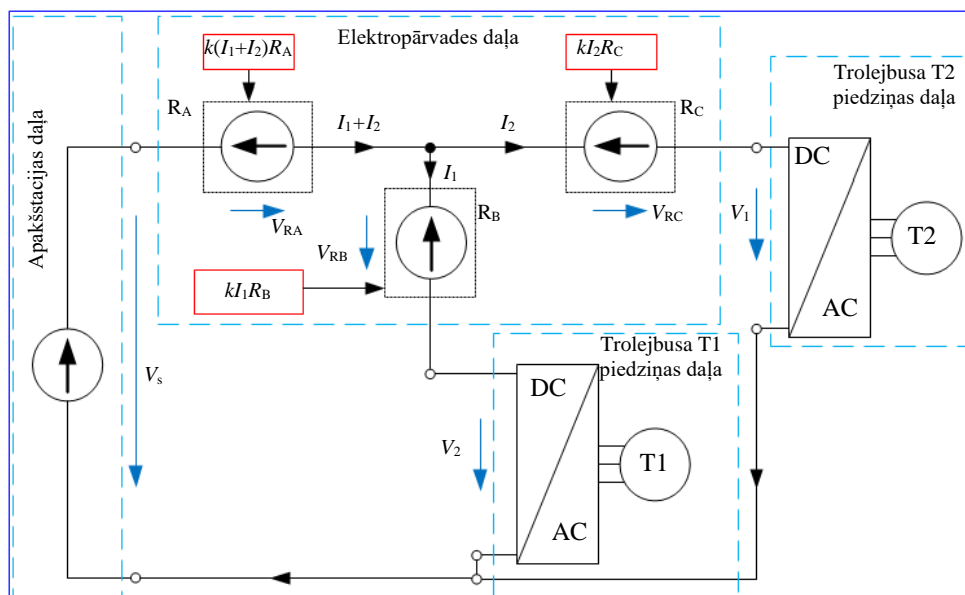
$$P_{RA(T1)} = (I_1^2 + I_1 I_2) R_A, \quad (2.38.)$$

$$P_{RA(T2)} = (I_2^2 + I_1 I_2) R_A. \quad (2.39.)$$

2.38. un 2.39. izteiksmes summējot, tiek iegūta 2.37. izteiksme.

2.4.3. Elektropārvades zudumu modelēšana ar sprieguma avotu elementu izmantošanu divu trolejbusu kustības gadījumā

Viens no modeļa variantiem var sastāvēt no trīs apakšsistēmām, kas ietver rezistoru ķēdes un imitē attiecīgās 2.34. un 2.35. attēlā redzamās pretestības R_A , R_B un R_C , regulējot rezistoru ķēdes saskaņā ar pretestības izmaiņas soli un abu trolejbusu atrašanās vietām, izmantojot iepriekš izvestās 2.32., 2.34. un 2.35. formulas. Tomēr šāds modelis ar trīs apakšsistēmām ir uzskatāms par samērā sarežģītu apjoma ziņā, tāpēc šāda modeļa izveide nav lietderīga un detalizēti šāds modelis turpmāk aplūkots netiks. Optimālāks variants ir trīs sprieguma avotu izmantošana, kas simulē attiecīgos sprieguma kritumus posmos ar pretestībām R_A , R_B un R_C , kā redzams 2.36. attēlā. Saskaņā ar abu trolejbusu atrašanās vietām reāllaikā tiek aprēķinātas pretestības R_A , R_B un R_C ar 2.32., 2.34. un 2.35. formulām, savukārt strāvu vērtības šajos posmos tiek izmērītas ar virtuālajiem ampērmetriem, kuru mērījumi tiek izmantoti attiecīgo avotiem uzdodamo spriegumu aprēķinā ar Oma likuma formulām līdzīgi kā iepriekš viena trolejbusa modelim ar sprieguma avotu no 2.26. attēla. Sprieguma avotiem uzdodamo spriegumu vērtību aprēķināšanas formulas parādītas 2.36. attēlā sarkanos rāmjos 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.



2.36. att. Vienkāršota blokhēma divu trolejbusu kustības modelim ar sprieguma avotiem kontakttīkla sprieguma krituma simulēšanai ar gadījumu, kad abi trolejbusi paātrinās.

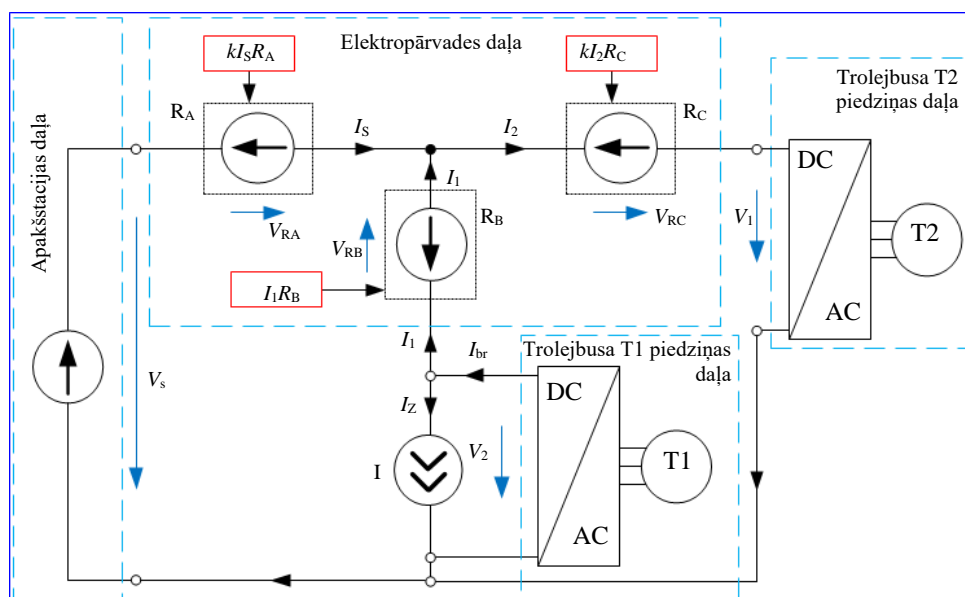
Konkrētajam modelim trolejbusa bremsēšanas jeb jaudas rekuperācijas režīmā ir iespējams simulēt rekuperētās jaudas zudumus invertorā. Ja pieņem, ka trolejbuss T_1 bremsē un rekuperētā jauda tiek padota ātrumu uzņemošā trolejbusa T_2 virzienā, tad no tās jaudas, kas tiek

padota uz trolejbusu T_2 , var atrēķināt nost invertorā zaudēto jaudu, izmantojot strāvas avotu, kas pieslēgts paralēli T_1 piedziņai ar strāvas plūsmas virzienu no pozitīvās polaritātes līnijas uz negatīvās polaritātes līniju. Kā redzams 2.37. attēlā, T_1 reģenerētā strāva I_{br} plūst T_2 virzienā, taču ar strāvas avota I palīdzību noteikta daļa I_z tiek atrēķināta saskaņā ar formulu:

$$I_z = (1 - \eta)I_{br}, \quad (2.40.)$$

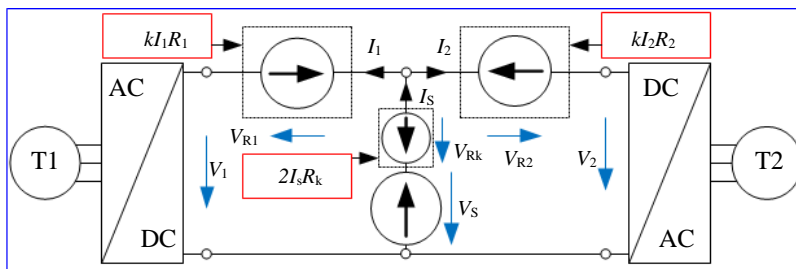
kur η – trolejbusa T_1 piedziņas invertora lietderības koeficients.

Konkrētajā situācijā var pieņemt, ka strāva I_{br} ir tā, kas nav tikusi novadīta uz bremžu rezistoru, bet tikusi padota uz T_2 , tāpēc attiecībā pret šo strāvu ir jāņem vērā zudumi invertorā. Šādā veidā var panākt, ka T_1 piedziņas invertorā zaudētā jauda tiek ņemta vērā samazinot rekuperētās strāvas apjomu tā, ka jaudas samazinājums atbilst invertorā zaudētās jaudas apjomam. Kā redzams 2.37. attēlā, sprieguma avota R_B sprieguma aprēķinā pirms I_1 un R_B reizinājuma šoreiz nav koeficienta k , jo rekuperētās jaudas zudumi invertorā netiek kompensēti ar papildus rekuperēto strāvu, atšķirībā no apakšstacijas gadījuma, kur var paņemt papildus strāvu. Zudumi T_2 piedziņas invertorā gan tiek kompensēti, bet attiecīgā papildus strāva, kas ņemta no apakšstacijas, plūst tikai posmos R_A un R_C .



2.37. att. Divu trolejbusu kustības modeļa shēma ar sprieguma avotiem kontakttīkla sprieguma krituma simulēšanai gadījumā, kur viens trolejbuss bremzē, otrs – uzņēms ātrumu.

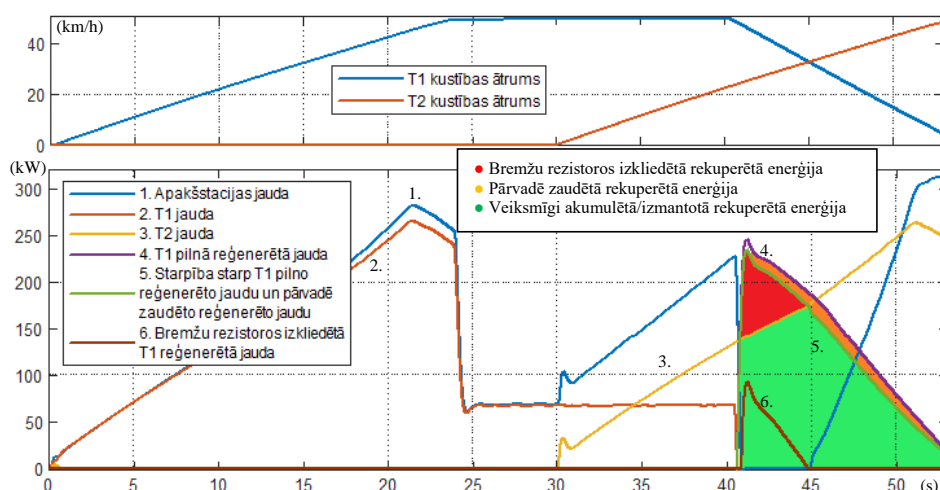
2.38. attēlā par piemēru parādīta blokshēma modelim, kas simulē divu trolejbusu kustību gadījumā, kad abi trolejbuss uzņēms ātrumu un apakšstacijas pievades kabeli kontakttīkla posmam pieslēgti starp abiem trolejbussiem kā iepriekš 2.27. attēlā. Šinī situācijā, uzdotot sprieguma vērtības sprieguma avotiem, pretestības R_1 un R_2 tiek aprēķinātas ar 2.9. formulu, kāda bija izmantota iepriekš viena trolejbusa kustības gadījumā.



2.38. att. Blokhēma divu trolejbusu kustības modelim ar sprieguma avotiem kontakttīkla sprieguma krituma simulēšanai, ar apakšstacijas pieslēgumu starp trolejbusiem.

2.4.4. *Bremzējošā trolejbusa rekuperētās jaudas plūsmas simulēšana un rezultātu interpretēšana*

Tiks veikts divu trolejbusu kustības simulācijas piemērs, balstoties 2.28. attēla situācijā, kur abi trolejbusi atrodas vienā kontakttīkla posma pusē attiecībā pret apakšstacijas pieslēgumu, un balstoties 2.36. un 2.37. attēlā parādītajos modeļos. Apakšstacijai tuvākais trolejbuss (T_1), ar 50 % aizpildītu pasažieru ietilpību Škoda 27Tr atrodas 200 m attālumā no apakšstacijas, uzsāk kustību un paātrinās līdz 50 km/h, attālinādamies no apakšstacijas. Trīsdesmitajā simulācijas sekundē kustību uzsāk otrs tāds pats trolejbuss (T_2), kurš atrodas 1400 m attālumā no apakšstacijas, attālinādamies no apakšstacijas. Pēc četrdesmitās sekundes T_1 uzsāk bremsēšanu, un 2.39. attēlā redzami simulāciju rezultāti – augšējā daļā kustības ātrumi, apakšējā daļā dažādu jaudu diagrammas vienā plaknē. Labākas uzskatāmības dēļ bremsējošā trolejbusa T_1 pilnā rekuperētā jauda attēlota pozitīvo vērtību plaknē. Enerģiju reāllaikā parasti aprēķina integrējot jaudu, tāpēc jaudas plaknē noteikti laukumi atbilst attiecīgās enerģijas apjomiem, kurus var iekrāsot noteiktās krāsās. 2.39. attēlā ir atšifrēti gan līkņu nosaukumi, gan laukumu iekrāsojumi.



2.39. att. Divu trolejbusu kustības simulācijas rezultātu diagrammas.

Simulācijas sākumā redzamās atšķirības starp apakšstacijas un T_1 jaudu patēriņiem ir nekas cits kā zudumi. Kad tajā pašā kontakttīkla posmā uzsāk kustību vēl viens trolejbus, tā apakšstacijas jaudas patēriņš palielinās, kā redzams, sākot ar trīsdesmito sekundi. Pēc četrdesmitās sekundes ir redzams, ka bremzējošais T_1 rekuperē vairāk jaudas, nekā pieprasa T_2 , līdz ar to daļa rekuperētās jaudas tiek izkliedēta bremžu rezistoros, bet apakšstacijas jaudas patēriņš ir nokrities līdz nullei. Līdz ko T_1 rekuperē mazāk jaudas par T_2 pieprasīto, tā attiecīgi tiek ņemta jauda no apakšstacijas, kā redzams sākot ar četrdesmit piekto sekundi. Tā kā enerģija reāllaikā parasti aprēķina integrējot jaudu, tad jaudu plāknē noteikti laukumi atbilst attiecīgo enerģiju apjomiem, kurus var iekrāsot noteiktās krāsās.

Kopumā pastāv neskaitāmi varianti nosimulējamām situācijām ar bremzējoša trolejbusa rekuperētās jaudas novadīšanu uz tādu trolejbusu, kas uzņem ātrumu, un atrodas tajā pašā kontakttīkla posmā. Jebkurā situācijā rekuperētās jaudas novadīšanas efektivitāti nosaka, piemēram, savstarpējais attālums starp trolejbusiem, ātrumu uzņemošā trolejbusa attīstītā jauda, transportlīdzekļu masas, utt. Taču pēc veiktās simulācijas rezultātiem var redzēt, ka pie salīdzinoši gara savstarpējā attāluma (konkrētajā gadījumā līdz 1,5 km) elektropārvadē zaudētās rekuperētās jaudas apjoms ir neliels attiecībā pret visu reģenerēto jaudu. Taču visbūtiskāk rekuperētās jaudas akumulēšanas efektivitāti ietekmē tas, vai tā rekuperēšanās brīdī var tikt novadīta uz kādu citu tajā pašā posmā esošu trolejbusu un vai pieprasītā jauda nav daudz mazāka par rekuperēto jaudu. Jo rekuperētā jauda augstāka par ātrumu uzņemošā trolejbusa pieprasīto jaudu, jo lielāka daļa no šīs jaudas tiek izkliedēta bremžu rezistoros.

Pēc pieredzes, kas gūta izstrādājot divu trolejbusu kustības modeli ar elektropārvades zudumu simulēšanu, var droši apgalvot, ka ir iespējams izstrādāt modeli arī situācijām, kad vienā un tajā pašā kontakttīkla posmā atrodas arī trīs un vairāk trolejbusu. Taču tā kā atsevišķi gaisvadu kontakttīkla posmi parasti nemēdz būt garāki par 1,5 km līdz 2 km, tad var pieņemt, ka vienā posmā parasti atrodas divi trolejbusi, kas savā starpā var izmantot viens otra rekuperēto enerģiju.

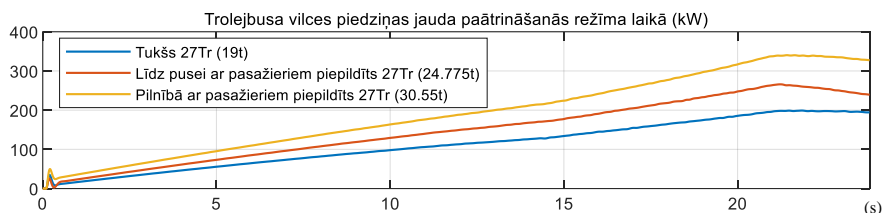
Tā kā kontakttīkla barošanas apakšstacija var apgādāt ar jaudu ne tikai vienu, bet arī vairākus atsevišķus un savstarpēji izolētus kontakttīkla posmus, tad izstrādātie divu trolejbusu kustības modeļi var tikt pārveidoti sarežģītāku situāciju simulēšanai, piemēram, par četrus trolejbusu kustības modeļiem, kas imitē situācijas, kur pirmie divi trolejbusi atrodas vienā no posmiem, otri divi – otrā. Šādā gadījumā tiek imitēta apakšstacija, kas apgādā divus gaisvadu kontakttīkla posmus, jo rekuperētā enerģija bez problēmām var tikt novadīta arī uz citiem posmiem, pie kuriem pieslēgta viena un tā pati apakšstacija.

2.5. Trolejbusa kontakttīkla gaisvadu temperatūras izmaiņas ietekme uz elektropārvades pretestību, zudumiem un apakšstacijas enerģijas patēriņu

Pēc gaisvadu kontakttīkla elektropārvades pretestības aprēķināšanas un modelēšanas metožu izstrādes var veikt trolejbusa kustības simulēšanu pie dažādām elektropārvades pretestībām atkarībā no gaisvadu temperatūras, lai pētītu, cik lielā mērā gaisvadu temperatūra ietekmē elektropārvadē zaudēto enerģiju un pilno apakšstacijas enerģijas patēriņu.

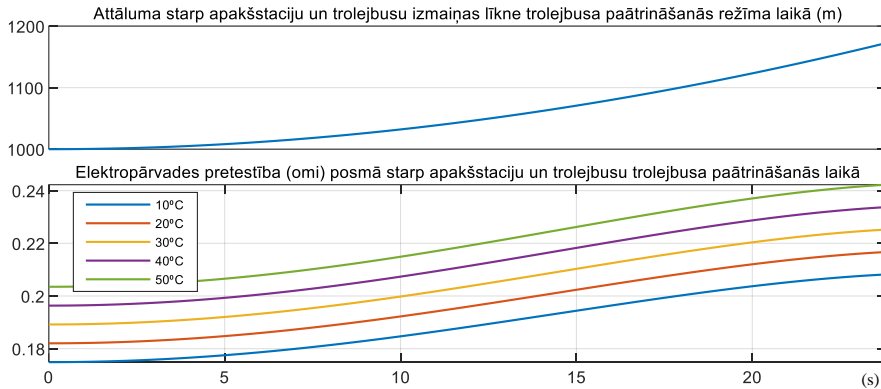
Turpmāk tiks aplūkots tukša, līdz pusei ar pasažieriem piepildīta un pilnībā ar pasažieriem piepildīta trolejbusa 27Tr kustība, kas ilgst 23,8 sekundes, kuru laikā 27Tr vienmērīgi paātrinās no 0 km/h līdz 50 km/h lineāras ātruma līknes veidā, attālinoties no apakšstacijas. Tiks salīdzināti elektropārvadē zaudētās enerģijas apjomi E_Z un apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa apjomi E_S pie šādiem sākotnējiem attālumiem d starp trolejbusu un apakšstaciju: 0 m; 500 m un 1000 m. Līdz šim iepriekšējo apakšnodaļu simulācijās pārvades pretestības tika aprēķinātas, 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 2.2. formulu šādā temperatūrā: 10 °C; 20 °C; 30 °C; 40 °C un 50 °C. Tātad, ja tiek aplūkoti trīs trolejbusa 27Tr masu varianti trijiem dažādiem attālumiem d un katram no šiem d tiek aplūkoti pieci gaisvadu temperatūru varianti, tad pavisam kopā iznāk četrdesmit pieci atsevišķi gadījumi, kuru simulēšana būtu ļoti laikietilpīgs process. Lai nebūtu jāveic 45 simulācijas, tika veikti skaitliski aprēķini *MS Excel* vidē.

Tā kā katrā no 45 gadījumiem trolejbusa kustības ātruma līknes būs vienādas, tāpēc arī piedziņas jaudas līknes būs vienādas. Pirms aprēķinu veikšanas tomēr ir jāveic vismaz trīs simulācijas, lai iegūtu piedziņas jaudas līknes trīs minētajiem trolejbusa 27Tr noslodzes variantiem. Ja 23,8 sekunžu ilgai trolejbusa paātrināšanās režīma simulācijai laika solis ir 0,005 sekundes, tad simulācijas laikā tiek ģenerētas pavisam kopā 4760 piedziņas jaudas P_d vērtības (iegūst, 23,8 izdalot ar 0,005), kas veido jaudas līkni laikā, un 2.40. attēlā redzamas attiecīgās jaudu līknes.



2.40. att. Trolejbusa 27Tr jaudas līknes pie trīs dažādām trolejbusa noslodzēm jeb masām.

Piedziņas jaudas P_d skaitliskās vērtības tiek iekopētas *MS Excel* dokumentā masīva veidā, kas sastāv no vienas 4760 skaitļu kolonnas, lai turpat varētu veikt pārējos turpmāk aprakstītos aprēķinus. Vēl aprēķinu veikšanai vajadzīgas piecām dažādām temperatūras vērtībām atbilstošo elektropārvades pretestību R vērtību kolonnas jeb masīvi. Attiecīgās pretestības vērtības var iegūt gan no simulācijām, gan aprēķinu veidā ar 2.2. formulu, ja no simulācijas iegūstam attāluma d izmaiņas vērtības trolejbusa kustības laikā. 2.41. attēlā parādīts piemērs ar elektropārvades pretestības līknēm pie piecām dažādām temperatūrām gadījumam, kad sākotnējais attālums starp trolejbusu un apakšstaciju ir 1 km, un trolejbuss pārvietojas, attālinādams no apakšstacijas.



2.41. att. Elektropārvades pretestība gaisvadu līnijas posmam starp apakšstaciju un trolejbusu paātrināšanās režīma laikā dažādās gaisvadu līnijas vadu temperatūrās.

Zinot piedziņas jaudu, var aprēķināt enerģijas patēriņu, kādu piedziņa patērē noteiktos laika posmos t , pēc formulas:

$$E_d = P_d t. \quad (2.41.)$$

2.41. formulā un arī turpmākajās formulās $t = 0,005$ s. Lai arī piedziņas jauda P_d ir mainīga 23,8 s laikā, 2.41. formulā tā uzrakstīta ar lielo burtu tāpēc, ka P_d tiek pieņemta kā konstanta katrā sekojošā laika intervālā ar ilgumu $t = 0,005$ s. Tas pats attieksies arī uz piedziņas strāvu I un piedziņas spriegumu V_d . 2.41. formulā $t = 0,005$ s un tas nozīmē, ka attiecīgā E_d atbilst tikai tai enerģijai, kas tiek patērēta tikai noteiktā 0,005 s posmā ar noteiktu P_d . Savukārt pilnā enerģija E_D , kādu piedziņa patērē visu 23,8 sekunžu laikā, tiek aprēķināta kā 4760 atsevišķu ar 2.41. formulu aprēķināto E_d summa.

$$E_D = \sum_{n=1}^{4760} P_{dn} t = \sum_{n=1}^{4760} E_{dn}. \quad (2.42.)$$

Šo situāciju var uzskatīt par 2.2.1 apakšnodaļā izvestās un 2.2. tabulā parādītās strāvas I formulas praktiskas pielietošanas piemēru, jo turpmāko aprēķinu veikšanai ir nepieciešams aprēķināt piedziņas strāvu I katrai P_d pavisam kopā 4760 reizes. Var aprēķināt arī attiecīgos piedziņas spriegumus V_d katrai P_d 4760 reizes, taču V_d vairs nebūs nepieciešams turpmāko aprēķinu veikšanai.

Elektropārvadē pārvadē zaudēto enerģiju E_z var aprēķināt katrai P_d pavisam 4760 reizes pēc šādas formulas:

$$E_z = I^2 R t. \quad (2.43.)$$

2.43. formulā arī $t = 0,005$ s, un tas nozīmē, ka 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 sekunžu laikā tiek aprēķināta kā 4760 atsevišķu ar 2.43. formulu aprēķināto E_z summa:

$$E_Z = \sum_{n=1}^{4760} I_n^2 R_n t = \sum_{n=1}^{4760} E_{zn} \quad (2.44.)$$

Ir iespējams iegūt arī apakšstacijas pilnās jaudas patēriņa likni, aprēķinot tās jaudu 4760 reizes pie attiecīgas P_d , I un R pēc formulas, kur $t = 0,005$ s:

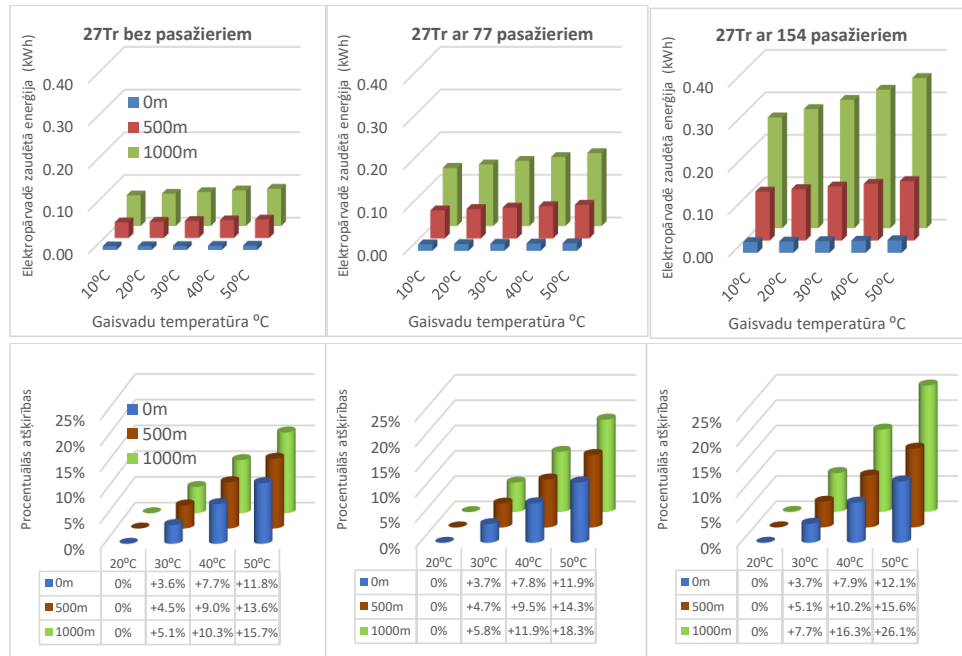
$$P_s = \frac{(I^2 R + P_d)t}{\eta_1 \eta_2}, \quad (2.45.)$$

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

Apakšstacijas pilno enerģijas patēriņu E_s 23,8 sekunžu laikā var aprēķināt ar dažādām izteiksmēm, kur $t = 0,005$ s:

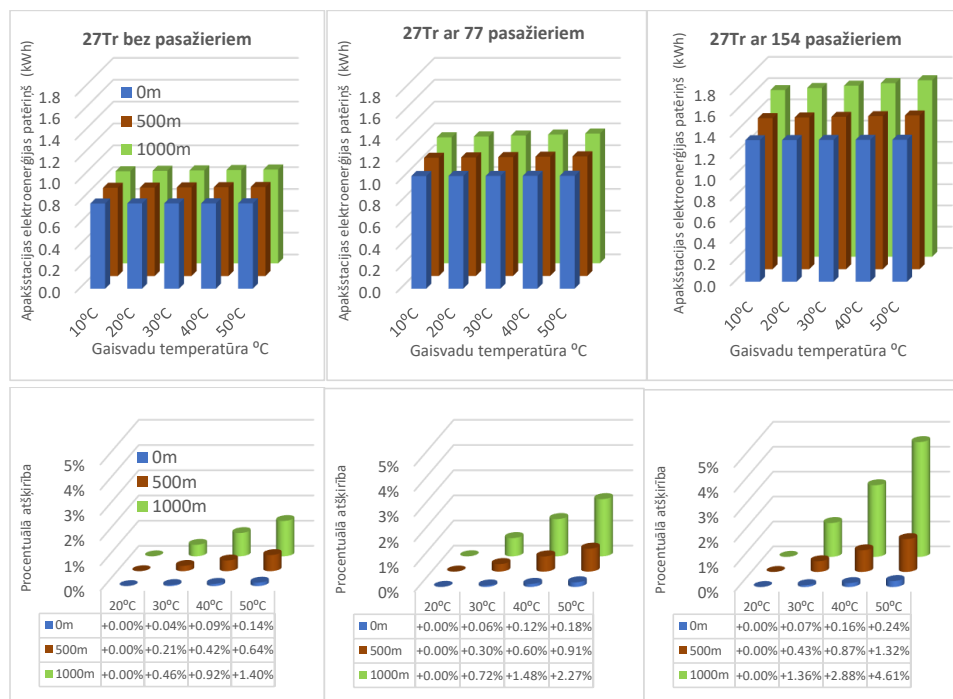
$$E_s = \sum_{n=1}^{4760} \frac{(I_n^2 R_n + P_{dn})t}{\eta_1 \eta_2} = \sum_{n=1}^{4760} \frac{(E_{zn} + E_{dn})}{\eta_1 \eta_2} = \sum_{n=1}^{4760} P_{sn} = \frac{E_Z + E_D}{\eta_1 \eta_2} \quad (2.46.)$$

Elektropārvadē zaudētās enerģijas E_Z vērtības, kas aprēķinātas ar 2.44. formulu, redzamas 2.42. attēlā, kura augšējā daļa ļauj vizuāli salīdzināt skaitliskās vērtības iepriekš minētajiem gadījumiem. 2.42. attēla apakšējā daļā parādīts, par cik procentiem gadījumos ar 30 °C, 40 °C un 50 °C gaisvadu temperatūrām zudumi ir lielāki salīdzinājumā ar 20 °C gadījumu.



2.42. att. Elektropārvadē zaudētās enerģijas skaitlisko vērtību stabiņi un procentuālās atšķirības, salīdzinot ar 20 °C gadījumu.

Apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa E_s vērtības, kas aprēķinātas ar 2.46. izteiksmi, redzamas 2.43. attēlā, kura augšējā daļa ļauj vizuāli salīdzināt skaitliskās vērtības iepriekš minētajiem gadījumiem. 2.43. attēla apakšējā daļā parādīts, par cik procentiem gadījumos ar 30 °C, 40 °C un 50 °C gaisvadu temperatūrām apakšstacijas enerģijas patēriņš ir augstāks salīdzinājumā ar 20 °C gadījumu. Skatoties uz 2.42. attēlu, var secināt, ka gaisvadu temperatūras paaugstināšanās diezgan manāmi palielina elektropārvadē zaudētās enerģijas apjomu, proti, virs 26 % pie 50 °C ar maksimālo trolejbusa noslodzi un 1000 m sākotnējo attālumu, savukārt skatoties uz 2.43. attēlu, var secināt, ka apakšstacijas pilnais enerģijas patēriņš gaisvadu temperatūras paaugstināšanās dēļ palielinās diezgan nebūtiski, proti, nesasniedzot 5 % pie 50 °C ar maksimālo trolejbusa noslodzi un 1000 m sākotnējo attālumu, neskatoties uz to, ka šinī gadījumā no apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa elektropārvadē zaudētā enerģija sastāda aptuveni 21 %, kas ir vērā ņemama daļa. Tā kā saskaņā ar simulāciju un aprēķinu rezultātiem gaisvadu temperatūras izmaiņa ļoti maz ietekmē apakšstacijas pilno enerģijas patēriņu, tad nākamās nodaļas, kurā aprakstīta trolejbusa superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmu plānošana, veiktajos aprēķinos un simulācijās attālumam starp apakšstaciju un trolejbusu esošo gaisvadu elektropārvades pretestību tika nolemts rēķināt ar 2.2. formulu, vadoties pēc vienas konstantas 20 °C gaisvadu temperatūras.



2.43. att. Apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa skaitlisko vērtību stabīni un procentuālās atšķirības, salīdzinot ar 20 °C gadījumu.

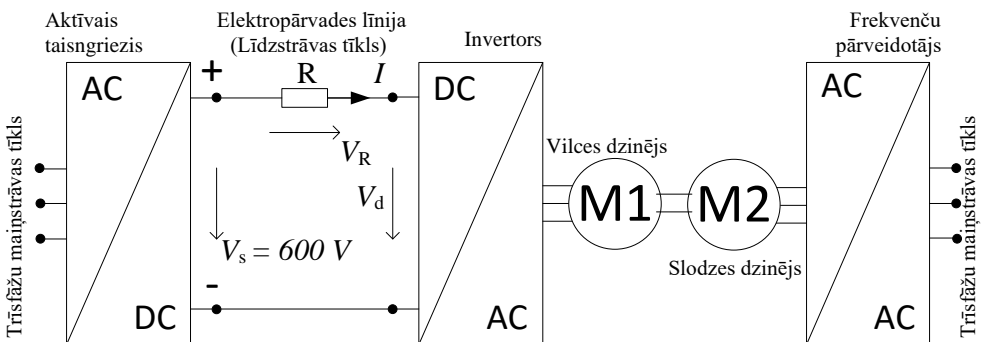
2.6. Līdzstrāvas elektropārvades līniju elektrisko parametru izmaiņu eksperimentāli mērījumi pie ilgstošām konstantām patērētāju jaudām

Līdz šim tika aprakstīts, kā pie mainīga līdzstrāvas līnijas garuma jeb posma starp avotu un patērētāju mainās sprieguma kritums un plūstošā strāva, rezultātā nodrošinot nepieciešamo jaudu patērētājam, kas aplūkotajās situācijās bija trolejbuss. Turklāt tika pieņemts, ka gaisvadu kontakttīkla posma pretestība starp abiem galapunktiem ir konstanta, tādējādi atbilstot konstantai vadu temperatūrai. Tāpēc ar pieejamo materiāltehnisko aprīkojumu tika nolemts eksperimentāli pārbaudīt, kā palielinās sprieguma kritums līdzstrāvas līnijā saistībā ar vadu temperatūras pieaugumu, ilgstoši darbinot patērētāju – elektrisko dzinēju – ar konstantu jaudu.

Tika veikti vairāki eksperimenti pie dažādiem vadu garumiem un dzinēja konstantām jaudām. Atšķirībā no trolejbuss kustības, kur ir mainīgs pārvades līnijas garums starp trolejbusu un barošanas apakšstaciju, šinī gadījumā visos eksperimentos līniju garumi bija nemainīgi. Līdz ar to veikto eksperimentu apstākļi ir pielīdzināmi, piemēram: dinamiskās uzlādes bateriju trolejbuss uzlādei no kontakttīkla stāvēšanas režīma laikā; bateriju elektroautobuss uzlādei no trolejbuss kontakttīkla stāvēšanas laikā; krānu un ekskavatoru barošanai; rūpnīcās esošiem dzinējiem vai industriāliem robotiem, kuru barošanas avoti atrodas vērā ņemamos attālumos.

Ieslēdzot dzinēju un uzsākot plūst jaudai, līdzstrāvas līnijas vadi sāk pakāpeniski uzsilt. Noteiktu laiku vadu temperatūra palielinās, līdz sasniedz noteiktu vērtību T_{max} , pie kuras temperatūra palielināties pārstāj un turpmāk saglabājas nemainīga pie nosacījuma, ka apkārtējās vides temperatūra arī saglabājas nemainīga. T_{max} var palielināties, kad palielinās apkārtējās vides temperatūra, un samazināties, kad samazinās apkārtējās vides temperatūra.

Eksperimentu veikšanas stenda principiālā shēma redzama 2.44. attēlā ar rezistoru R, kas simbolizē elektropārvades līnijas “+” un “-” vadu kopējo elektrisko pretestību. Eksperimentos tika izmantots divu sajūgtu motoru stends, kuru var uzskatīt arī par vilces piedziņas emulatoru, jo ar motoru M1 varētu ekvivalenti imitēt, piemēram, trolejbuss dzinēju samazinātas jaudas mērogos, bet ar M2 – trolejbuss masas izraisīto noslodzi. Faktiski šis stends ir industriālā robota KUKA emulators, kas tika izstrādāts kādreizēja Eiropas projekta AREUS ietvaros, kur RTU uzdevumos ietilpa pētīt KUKA robota enerģētiskos parametrus un darbības energoefektivitāti [49]. Eksperimentālie mērījumi tika veikti attiecībā pret dzinēju M1, lai arī dzinējs M2 to slogos. Aktīvais taisngriezis, pats stends un saritināti kabeļi redzami 2.45. attēlā.



2.44. att. Eksperimentālo mērījumu veikšanas iekārtu slēguma principiālā elektriskā shēma.



2.45. att. A – aktīvais taisngriezis; B – dzinēju stends un jaudas analizators uz galda; C – saritināti kabeļi.

Eksperimentu veikšanai tika izmantoti divi aptuveni simt metru gari kabeļi ar četrām vara 6mm^2 šķērsgriezuma laukuma dzīslām, no kurām tika saslēgtas noteiktu garumu elektroapgādes līnijas. Sākumā neuzsildītu kabeļu vadu pretestība tika nomērīta, izmantojot mikroohmmetru, kā redzams 2.46. attēlā. Jāsaprot, ka šīnī situācijā vadu temperatūra ir vienāda ar apkārtējās vides jeb istabas temperatūru, kura atstāj ietekmi uz nomērīto pretestību. Ja, piemēram, ziemas laikā vadam nomērīts pretestību istabas temperatūrā, un pēc tam vadu iznesīs ārā, kādu laiku atstās atdzišanai un tad atkal nomērīs pretestību, tad pēdējā mērījumā uzrādīsies attiecīgi zemāka pretestība. Taču konkrētajā situācijā, veicot mērījumus, izrādījās, ka vienam no kabeļiem elektropārvades pretestība bija $0,326\ \Omega$ katrai no dzīslām, otram kabelim – $0,336\ \Omega$ katrai no dzīslām. Iemesls šai aptuveni 3 % atšķirībai atklājās izritinot kabeļus un novietojot tos vienu otram blakus. Izrādījās, ka abi kabeļi nav precīzi vienāda 100 m garuma, jo viens no kabeļiem ir par aptuveni 1 m īsāks par 100 m, otrs – par aptuveni 1,5 m garāks. Tātad tie tikuši nevienmērīgi nogriezti no spoles, saglabājot 200 m kopējo garumu. Līdzstrāvas elektropārvades līnija sastāvēja no vēl diviem 10 m gariem vadiem arī ar $6\ \text{mm}^2$ šķērsgriezuma laukumu, kuri savienoja aktīvo taisngriezi ar garo kabeļu vadiem. Tomēr vienkāršības pēc uz izmantotajiem līniju vadu slēgumu variantiem atsauksimies kā uz 200 m, 300 m un 400 m garām līnijām.



2.46. att. Kabeļu dzīslu pretestības mērīšana un kabeļu garumu salīdzināšana.

Pie augstām strāvām kabeļi tomēr ir obligāti jāizritina, lai tiktu nodrošināta pienācīga dzesēšana, jo būdami saritināti spolēs kā 2.46. attēlā, tie var uzkarst līdz kritiski augstām temperatūrām, liekot kust izolācijas materiāliem. Tāpēc kabeļi tika izritināti un izvietoti ārpus laboratorijas telpas pa gaitēņa grīdu, kā redzams 2.47. attēlā.



2.47. att. Līdzstrāvas tīkla fizikālais modelis ar izritinātiem kabeļiem.

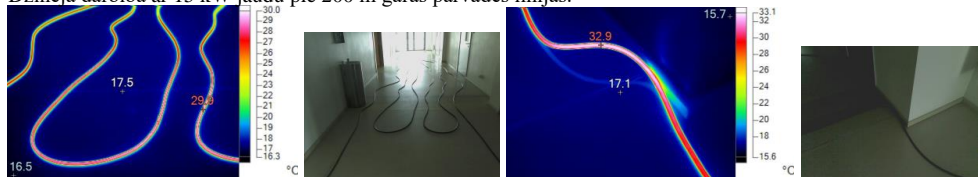
Pie katra no minētajiem 200 m, 300 m un 400 m līnijas garumiem dzinējs tika darbināts aptuveni 35 minūtes ar 15 kW jaudu. Tad sekoja pārtraukums kabeļu atdzesēšanai, pēc kura dzinējs tika darbināts aptuveni 35 minūtes ar 20 kW jaudu. Tātad tika veikti pavisam seši eksperimenti. 200 m līnijai tika izmantots viens kabelis, par kura visām četrām dzīslām plūda strāva, 300 m līnijai – abi kabeļi, un šinī kabeļu slēgumā pa dažām dzīslām strāva neplūda, 400m līnijai – abi kabeļi, pa kuru visām astoņām dzīslām plūda strāva.

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. Ar jaudas analizatoru tika izmērīta līnijas strāva I , izmantojot strāvas šuntu, un spriegums dzinēja invertora ieejā V_d , bet jaudu dzinēja invertora ieejā P_d , analizators aprēķina kā izmērīto I un V_d vērtību reizinājumu. Jaudas analizators mērījumus veica vienu reizi sekundē, līdz ar to 35 minūšu laikā tika veikti 2100 parametru I , V_d un P_d mērījumi, rezultātā iegūstot minēto parametru vērtību raksturlīknes. Aktīvā taisngrieža spriegums $V_s = 600$ V, savukārt sprieguma kritumu līnijā V_R var aprēķināt tieši tā pat kā iepriekš trolejbusa gadījumā ar apakšstacijas spriegumu un trolejbusa piedziņas spriegumu, proti, kā V_s un V_d starpību:

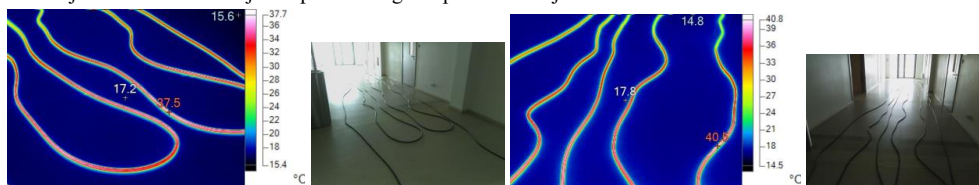
$$V_R = V_s - V_d. \quad (2.47.)$$

Kad patērētāja spriegums V_d pārstāj samazināties un līnijas spriegums V_R pārstāj palielināties, var uzskatīt, ka ir sasniegta maksimālā vadu temperatūra, kuras aptuvenas vērtības tika nomērītas ar termogrāfijas kameras palīdzību. 2.48. attēlā redzami divi kadri no katra veiktā eksperimenta, kas uzņemti apmēram pēdējās minūtēs, kad V_d ir pārstājis samazināties. Parādīti gan infrasarkanu staru attēli ar krāsu paletēm temperatūras vērtību atšifrēšanai, gan tie paši attēli redzamajā gaismā. Var novērot, ka visa kabeļa garumā tā temperatūra dažādās vietās var būt atšķirīga 3 °C līdz 5 °C robežās. Izteikti nevienmērīgi kabeļi sila pie 300 m līnijas, jo šinī variantā vienā no kabeļiem strāva plūda ne pa visām dzīslām, tāpēc var redzēt, ka attiecīgie vadi kabeļa iekšienē ir spirālveidā, turklāt tas kadrs, kurā skaidri redzama viena vada silšana kabeļi, ir vienīgais, kas uzņemts apmēram eksperimenta vidū, jo uz eksperimenta beigām temperatūras kontrasts izlīdzinās.

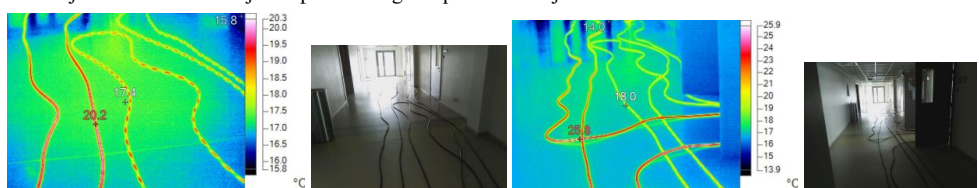
Dzinēja darbība ar 15 kW jaudu pie 200 m garas pārvades līnijas.



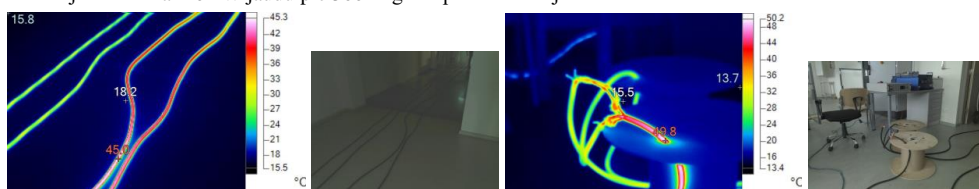
Dzinēja darbība ar 20 kW jaudu pie 200 m garas pārvades līnijas.



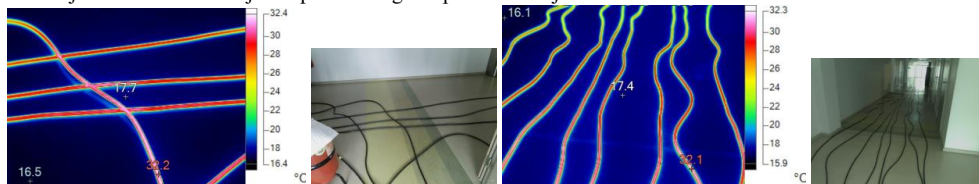
Dzinēja darbība ar 15 kW jaudu pie 300 m garas pārvades līnijas.



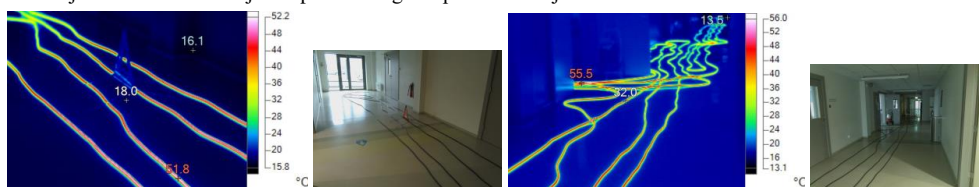
Dzinēja darbība ar 20 kW jaudu pie 300 m garas pārvades līnijas.



Dzinēja darbība ar 15 kW jaudu pie 400 m garas pārvades līnijas.



Dzinēja darbība ar 20 kW jaudu pie 400 m garas pārvades līnijas.



2.48. att. Infrasarkanās un redzamās gaismas kadri ar katrā no veiktajiem eksperimentiem.

Eksperimenta laikā pārvades pretestību ar mikroometru mērīt nevar, jo iebūvēta strāvas avota dēļ to nav iespējams pielietot ķēdēs ar ieslēgtiem enerģijas avotiem. Arī pēc 35 minūtēm pie uzsilušiem kabeļiem pretestības netika mērītas, jo, lai no dotā stenda garos kabeļus atvienotu, ir jāveic vairāku minūšu procedūra, kuras laikā vadi ir būtiski atdzisuši. Ar

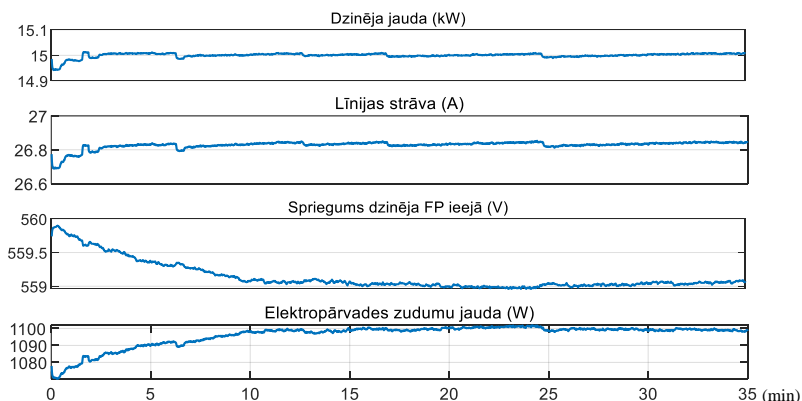
termogrāfijas kameras palīdzību tika noskaidrots, ka, sākot strāvas pārtraukšanas brīdi, vadu temperatūra samazinās ļoti strauji, bet pēc zināma laika temperatūra samazinās mazāk strauji.

Ekspimentāls konstantu 15 kW un 20 kW jaudu salīdzinājums 200 m garā līnijā

Tālāk no 2.49. līdz 2.56. attēlam apskatītās dzinēja jaudas P_d , plūstošās strāvas I un dzinēja invertora ieejas sprieguma V_d vērtību līknes ir uzņemtas eksperimentāli ar jaudas analizatoru, darbinot dzinēju ar 15 kW konstantu jaudu 35 minūtes un ar 20 kW konstantu jaudu arī 35 minūtes. Starp abiem eksperimentiem pie tā paša līnijas garuma tika ieturēta pauze uz aptuveni stundu, lai līnijas vadi atdzistu. Savukārt pārvades pretestības vērtību līknes tika iegūtas kā V_R un I dalījums, un pārvades zudumu jaudas līknes tika iegūtas kā I^2 un R reizinājums.

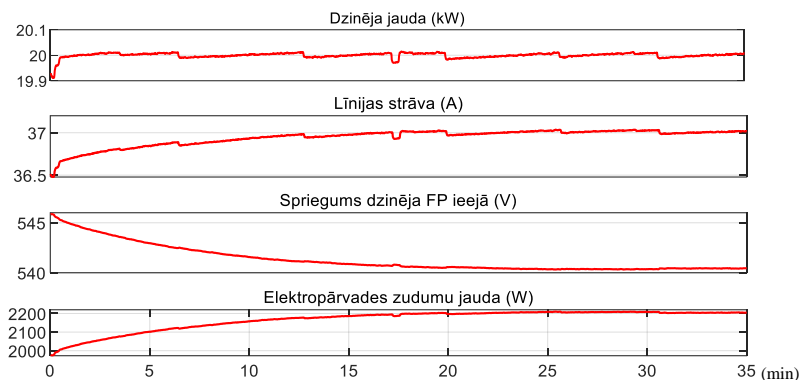
No 2.49. līdz 2.54. attēlam var redzēt, ka konkrētajos apstākļos tomēr nebija iespējams nodrošināt pilnīgi konstantas 15 kW un 20 kW jaudu līknes, jo pastāv nelielas svārstības. Ja dzinēja darbības laikā jaudas regulēšanas potenciometru neaiztiek, tad pēc idejas dzinēja darba jaudai vajadzētu saglabāties konstantai, taču neskatoties uz to, dzinēja darbības laikā jaudai tik un tā bija tendence nedaudz pieaugt. Kad jaudas pieaugums bija par aptuveni 5 W virs noteiktajiem 15 kW vai 20 kW, tika manuāli mēģināts samazināt jaudu atpakaļ uz attiecīgajiem 15 kW vai 20 kW. Dažreiz jaudu līknēs redzami nelieli robi, kuri atsaucas arī uz plūstošo strāvu līknēm, jo regulēšanu ar potenciometru ne vienmēr izdevās veikt pilnīgi precīzi. Ja jauda tika samazināta par daudz, tad tā bija atkal jāpalielina. Taču kopumā visas jaudas līknes tuvināti var uzskatīt par konstantām.

2.49. attēlā var redzēt, ka darbinot dzinēju ar 15 kW jaudu pie 200 m garas līnijas, sākotnējais spriegums dzinēja invertora ieejā $V_d = 560$ V, bet 35 minūšu laikā tas nokritās tikai par 1 V. Līdz ar to arī nav būtiska strāvas pieauguma. Turklāt var redzēt, ka V_d pārstāj kristies jau pēc aptuveni 15 minūtēm, nozīmējot, ka ar šo brīdi tika sasniegta gan maksimālā līnijas temperatūra, gan maksimālā pretestība.



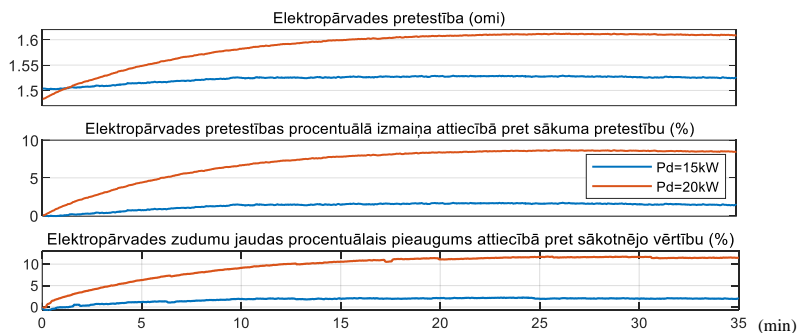
2.49. att. Mērījumu rezultāti, darbinot dzinēju ar 15 kW jaudu pie 200 m garas līnijas.

Saskaņā ar 2.50. attēlu, darbinot dzinēju ar 20 kW konstantu jaudu pie 200 m līnijas 35 minūtes, līnijas strāva pieauga par 0,5 A, sprieguma kritums palielinājās par aptuveni 6 V. Līdz ar to ir arī izteiktāks elektropārvadē zaudētās jaudas pieaugums salīdzinājumā ar 2.49. attēlu.



2.50. att. Mērījumu rezultāti, darbinot dzinēju ar 20 kW jaudu pie 200 m garas līnijas.

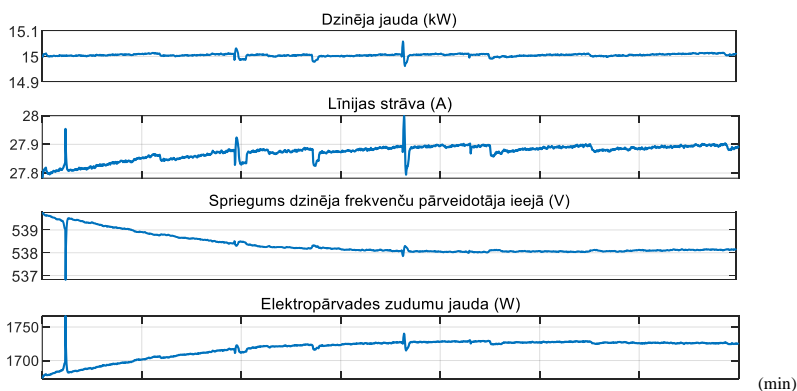
Sākotnējā pretestība pie 15 kW 2.51. attēlā ir nedaudz augstāka tāpēc, ka vispirms mērījumi tika veikti ar 20 kW un līnija vēl nebija pilnībā atdzisusi līdz apkārtējās vides temperatūrai.



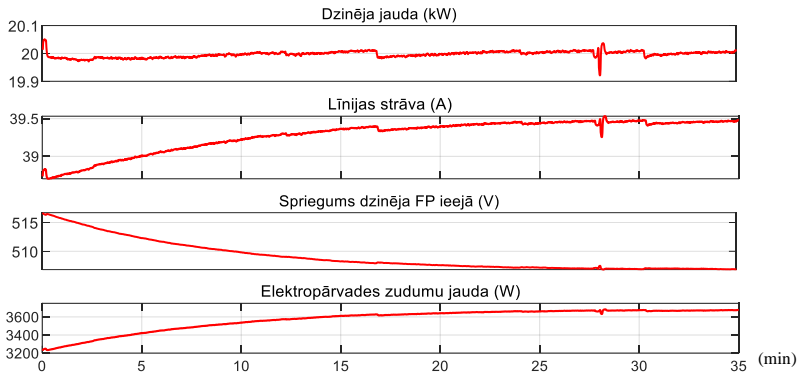
2.51. att. Rezultātu salīdzinājums 15 kW un 20 kW dzinēja jaudām pie 200 m garas līnijas.

Eksperimentāls 15kW un 20kW jaudu salīdzinājums 300m garā līnijā

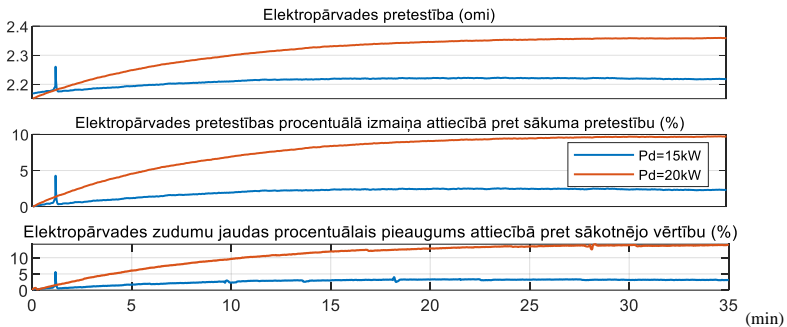
Pie 300 m garas līnijas, strāva pieauga par 0,1 A pie 15 kW un par 0,8 A pie 20 kW, sprieguma kritums palielinājās aptuveni par 1,5 V pie 15 kW un par 8 V pie 20 kW.



2.52. att. Mērījumu rezultāti, darbinot dzinēju ar 15 kW jaudu pie 300 m garas līnijas.



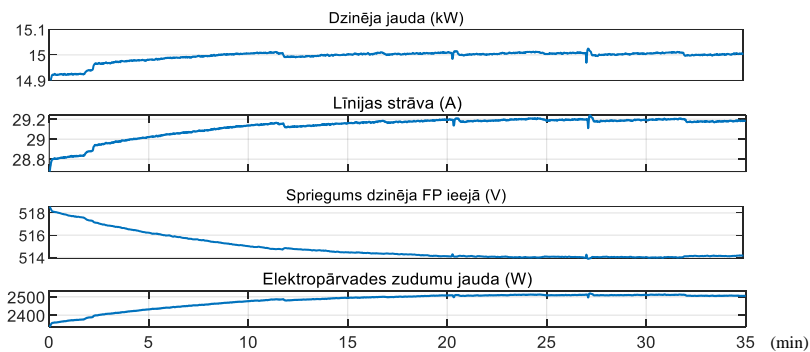
2.53. att. Mērījumu rezultāti, darbinot dzinēju ar 20 kW jaudu pie 300 m garas līnijas.



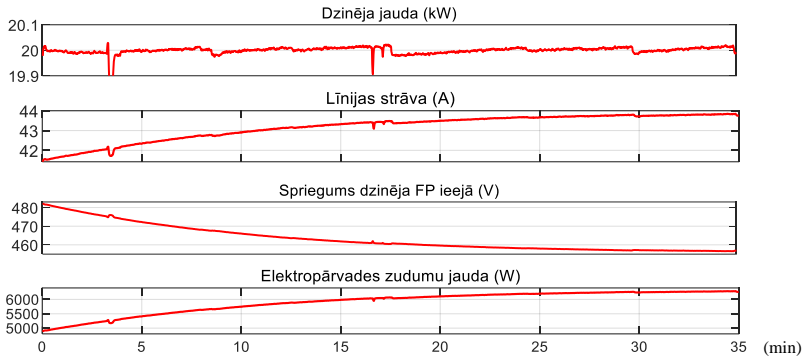
2.54. att. Rezultātu salīdzinājums 15 kW un 20 kW dzinēja jaudām pie 300 m garas līnijas.

Ekspimentāls konstantu 15kW un 20kW jaudu salīdzinājums 400m garā līnijā

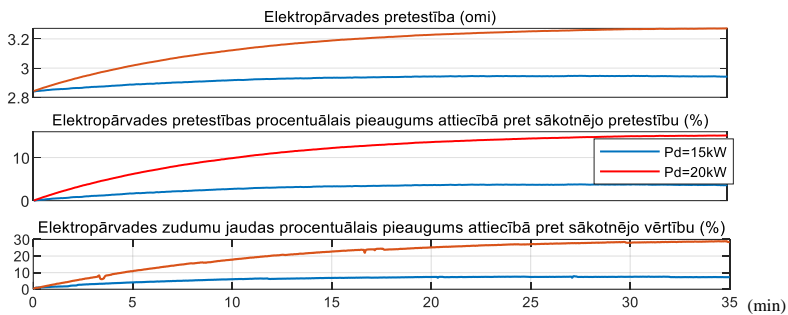
Pie 400 m garas līnijas, strāva pieauga par 0,4 A pie 15 kW un par 2,5 A pie 20 kW, sprieguma kritums palielinājās par aptuveni 4 V pie 15 kW un par 24 V pie 20 kW. Pretestības pieaugums 15 kW gadījumā ir aptuveni 4 %, 20 kW gadījumā – aptuveni 15 %.



2.55. att. Mērījumu rezultāti, darbinot dzinēju ar 15 kW jaudu pie 400 m garas līnijas.



2.56. att. Mērījumu rezultāti, darbinot dzinēju ar 20 kW jaudu pie 400 m garas līnijas.



2.57. att. Rezultātu salīdzinājums 15 kW un 20 kW dzinēja jaudām pie 400 m garas līnijas.

Pēc mērījumu rezultātiem izriet, ka pie ilgstošas strāvas plūsmas situācijās ar garākām elektropārvades līnijām un augstākām patērētāja jaudām līnijas vadu temperatūras pieauguma dēļ to pretestība var pieaugt līdz 15 %, vadoties pēc garākās 400 m līnijas un ar augstāko 20 kW jaudu (2.57. att.). Temperatūras ziņā tas nozīmē pieaugumu par aptuveni 40 °C.

Lai arī veiktajos mērījumos aktīvā taisngrieža spriegums bija 600 V jeb tāds pats, kā trolejbusa kontakttīkla barošanas apakšstacijas spriegums, tomēr salīdzinājumā ar trolejbusa kontakttīkla vadiem, kuru šķērssgriezuma laukums ir 100 mm², eksperimentālajos mērījumos izmantotie vadi, kuru šķērssgriezuma laukums ir 6 mm², ir ar būtiski augstāku pretestību. Tāpēc arī pie 15 kW un 20 kW jaudām, kuras no vienas puses ir krietni zemākas par trolejbusa jaudām, ir ievērojami sprieguma kritumi un zudumi. No tā var secināt, ka plānojot stacionāru elektriskās enerģijas patērētāju elektroapgādi variantos, kur barošanas avots atrodas tālākās distancēs no patērētāja un elektroapgādi nodrošina līdzstrāvas un industriālie tīkli, rekomendējams ielānāt vadus ar tādiem šķērssgriezuma laukumiem, pie kuriem elektropārvades zudumi ir pēc iespējas mazāki. Iekārtu un aprīkojumu instalācijās ir vērts pārbaudīt elektropārvades zudumu apjomu, nomērot spriegumu patērētāja ieejā un salīdzināt ar barošanas avota spriegumu. Ja dotā situācijā starpība ir ievērojama, tad var secināt, ka ir aktuāli elektropārvades zudumi, kurus varētu samazināt, nomainot esošos vadus ar lielāka šķērssgriezuma vadiem, vai jau esošiem vadiem pieslēdzot paralēli papildus vadus. Rezultātā samazinātos pilnais enerģijas patēriņš.

2.7. Secinājumi

Ja ir zināma pie gaisvadu kontaktīkla pieslēgta elektriskā transportlīdzekļa, piemēram, trolejbusa piedziņas patēriņa jaudas vērtību līkne kustības ciklā, barošanas apakšstacijas spriegums un pārvades pretestības izmaiņa posmā starp apakšstaciju un kustīgu transportlīdzekli, tad ir iespējams matemātiski aprēķināt plūstošo strāvu, trolejbusa piedziņas spriegumu un kontaktīkla sprieguma kritumu, lai tālāk varētu aprēķināt arī pilno enerģijas patēriņu. Šāds aprēķins prasa trīs vienādojumu sistēmas uzrakstīšanu, no kuras tiek izvesti trīs kvadrātvienādojumi trīs nezināmo parametru aprēķināšanai. Kvadrātvienādojumu dēļ nezināmajiem ir divas atrisinājuma formulas, no kurām pareizā jāizsecina pēc skaitliskā rezultāta, balstoties aprakstītajos loģiskajos apsvērumos, bet šādā veidā obligāti jāaprēķina tikai viens no nezināmajiem parametriem, jo pārējos nezināmos pēc tam var aprēķināt ar vispārzināmām formulām.

Sprieguma avota rezistoru ķēdes vietā trolejbusa kustības simulēšanas datormodelī, ir optimālākais gaisvadu kontaktīkla pretestības un pārvades zudumu simulēšanas variants, jo šāds modelis struktūras ziņā ir vienkāršāks un ar ātrāku simulācijas izpildes laiku, salīdzinot ar rezistoru slēguma izmantošanas variantu un ar matemātiskā aprēķina variantu.

Simulāciju gaitā tika noskaidrots, ka palielinoties gaisvadu temperatūrai un pretestībai, elektropārvades zudumu apjoms var pieaugt līdz 25 %, bet apakšstacijas pilnais enerģijas patēriņa pieaugums ir nepilni 5 %, neskatoties uz to, ka elektropārvades zudumu apjoms var arī pārsniegt 20% no pilnā apakšstacijas enerģijas patēriņa. Tāpēc turpmāk veiktajos pētījumos tika pieņemts, ka gaisvadu temperatūra ir 20 °C, kas visbiežāk ir pieņemta kā standarta temperatūra vadu pretestību aprēķinos.

Gadījumos, kad stacionāri elektriskās enerģijas patērētāji atrodas vērā ņemamos attālumos no enerģijas avotiem, var būt lieli elektropārvades zudumi un sprieguma kritumi īpaši, ja pārvades līnijas vadi ir salīdzinoši tievi. Tāpēc, ja starpība starp enerģijas avota un patērētāja spriegumu ir ievērojama, ir vērts apsvērt nomainīt esošās pārvades līnijas vadus ar biezākiem, vai paralēli esošiem vadiem pieslēgts papildus vadus, tādējādi samazinot pilno pretestību.

3. EKONOMISKU MOBILU EUS MĒROGOŠANA REKUPERĒTĀS ENERĢIJAS EFEKTĪVAS IZMANTOŠANAS NODROŠINĀŠANAI

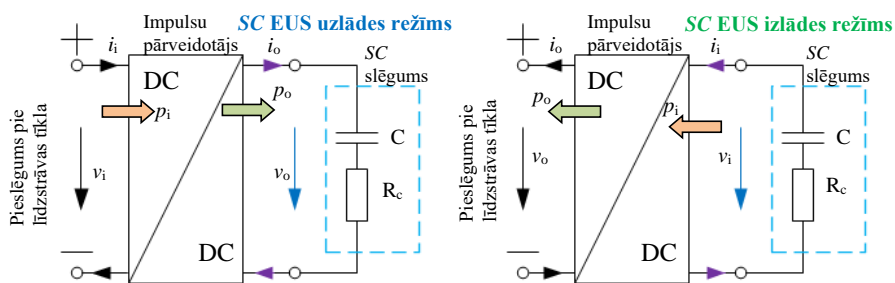
Turpmāk aprakstīto mobilo SC EUS mērķis nav nodrošināt transportlīdzeklim iespēju veikt garas autonomā režīma distances, bet gan nodrošināt iespēju lietderīgi izmantot transportlīdzekļa rekuperēto enerģiju. Tas nozīmē, ka bremsēšanas laikā rekuperētā enerģija gandrīz nekad netiek izkliedēta bremsēšanas rezistoros, bet gan tiek uzkrāta SC EUS. Savukārt pēc bremsēšanas sekojošā paātrinājuma laikā iepriekš uzkrātā enerģija tiek izlietota, apgādājot piedziņu, tādējādi izlādējot SC EUS un atbrīvojot vietu nākamā bremsēšanas režīma rekuperētās enerģijas uzkrāšanai. Tāpēc šādu EUS var uzskatīt par ekonomisku variantu.

Taču vispirms tiks aprakstīta promocijas darba gaitā izstrādātā metode, kas ļauj veikt impulsu pārveidotāja darbības vienkāršotu modelēšanu un simulēšanu bez iedziļināšanās paša pārveidotāja topoloģijā un bez komutācijas procesu simulēšanas.

3.1. Ar superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmu aprīkota trolejbusa kustības modelēšana

Līdzsprieguma impulsu pārveidotāji mēdz būt dažādi to uzbūves sarežģītības un sniegto iespēju ziņā, taču darbības pamatprincipi visiem pārveidotājiem būtībā ir līdzīgi. 3.1. 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 un ir redzams 3.1. attēlā. Kondensatora C kapacitāte atbilst visu SC šūnu kopējai kapacitātei, savukārt rezistora R_c pretestība – kopējai aktīvajai pretestībai. Minētie parametri tiek aprēķināti pēc elementu virknes un paralēlslēguma formulām atkarībā no SC šūnu slēguma konfigurācijas.



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

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

režīmā pie SC slēguma pieslēgtā pārveidotāja daļa uzskatāma par ieeju, pie tīkla puses pieslēgtā daļa – par izeju.

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 –

$$i_i v_i = i_o v_o. \quad (3.1.)$$

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

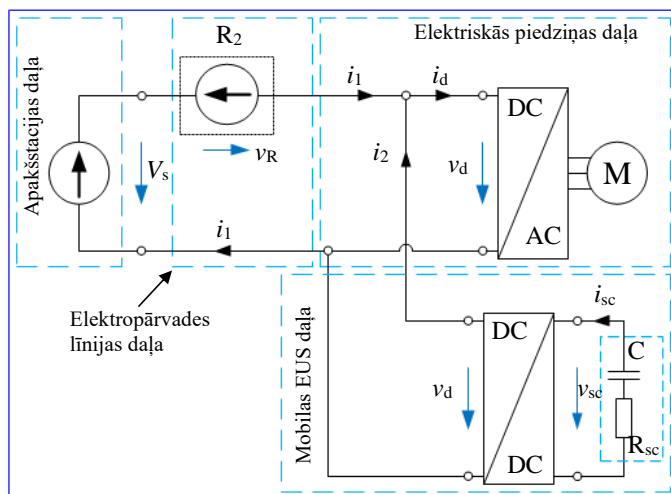
$$p_o = \eta p_i. \quad (3.2.)$$

Tāpēc 3.1. izteiksmi ir jāpārveido, iekļaujot pārveidotāja efektivitāti η , tādējādi iegūstot faktisko attiecību starp pārveidotāja ieejas un izejas strāvām un spriegumiem –

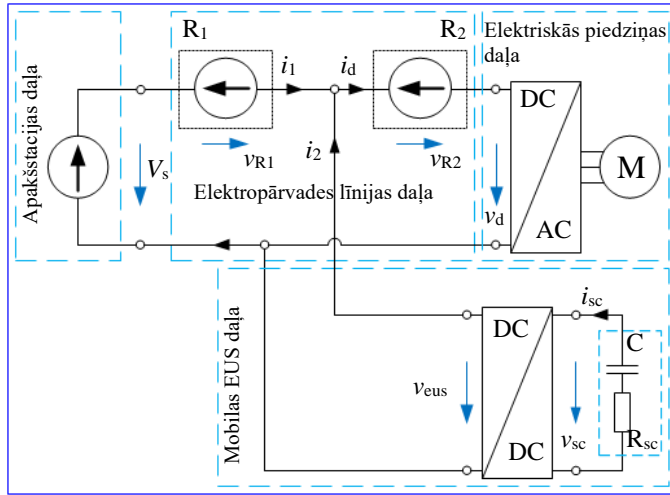
$$i_o v_o = \eta i_i v_i. \quad (3.3.)$$

3.1.1. Trolejbusa kustības un līdzsprieguma impulsu pārveidotāja darbības rezultātu simulēšana

Vienkāršota modeļa shēma trolejbusam, kas pieslēgts pie gaisvadu kontakttīkla un aprīkots ar mobilu SC EUS, redzama 3.2. attēlā, bet modeļa shēma trolejbusam, kas pieslēgts pie gaisvadu kontakttīkla ar pieejamu stacionāru SC EUS – 3.3. attēlā. Otrā varianta shēma atšķiras ar to, ka posmā starp EUS pieslēgumu pie tīkla un trolejbusa piedziņu ir iekļauts papildus sprieguma avots R_2 pārvades zudumu simulēšanai, jo šinī posmā plūst gan apakšstacijas, gan EUS strāvas.

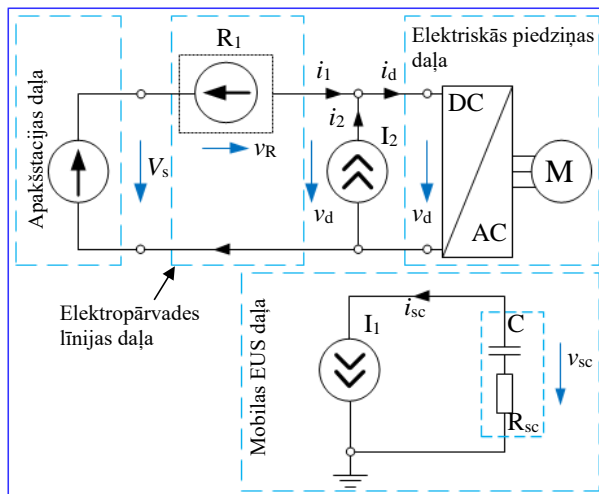


3.2. att. Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta un ar mobilu SC EUS aprīkota trolejbusa modeļa vienkāršota blokshēma.



3.3. att. Pie kontakttīkla pieslēgta un ar stacionāru SC EUS aprīkota trolejbusa modeļa shēma.

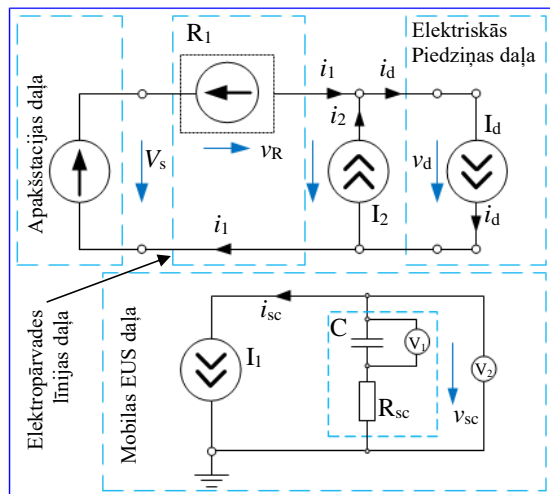
Lai nebūtu jāsimulē impulsu pārveidotāja komutācijas procesi, tika izstrādāts modelis, kur EUS izlāde un uzlāde tiek simulēta ar strāvas avotu palīdzību, izmantojot divas nesavienotas blokskāmas, kā redzams 3.4. attēlā ar mobilo SC EUS izlādi. Shēma augšpusē imitē tīkla pusi attiecībā pret pārveidotāju, savukārt shēma apakšpusē – SC pusi. Līdz ar to pats pārveidotājs simulēts netiek, bet tiek simulēti tā darbības rezultāti. Uzlādes procesa laikā abiem 3.4. attēlā redzamajiem strāvas avotiem ir pretēji strāvas plūsmas virzieni atšķirībā no parādītajiem.



3.4. att. Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta un ar mobilo SC EUS aprīkota trolejbusa modeļa ar divām nesavienotām blokskāmām vienkāršota shēma.

Ir vērts piebilst, ka ar strāvas avota palīdzību var simulēt arī trolejbusa piedziņu, kā redzams 3.5. attēlā. Šāds modelis ir vēl vienkāršotāks, jo neiekļauj invertora bloku un maiņstrāvas

dzinēja elementu. 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.



3.5. att. Pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgta un ar mobilo SC EUS aprīkota trolejbusa modeļa ar divām nesavienotām blokshēmām vienkāršota shēma.

SC EUS uzlādes gadījumā (3.5. att.) esošajiem strāvas avotiem ir pretēji plūšanas virzieni, salīdzinot ar parādītajiem, savukārt līdz impulsa pārveidotājam nonākusi jauda p_i ir zemāka par pilno rekuiperēto jaudu p_d invertora zudumu dēļ, tāpēc p_i tiek aprēķināta pēc 3.4. formulas.

$$p_i = \eta_{inv} p_d, \quad (3.4.)$$

kur η_{inv} – invertora lietderības koeficients.

Līdz ar to strāvas avotam I_2 iestatāmā strāva tiek aprēķināta pēc 3.5. formulas.

$$i_2 = \frac{p_i}{v_d}. \quad (3.5.)$$

Impulsa pārveidotājam cauri izgājusi jauda jeb impulsa pārveidotāja SC puses jauda p_{sc} ir zemāka par ieejas jaudu p_i pārveidotāja zudumu dēļ, tāpēc p_{sc} tiek aprēķināta pēc 3.6. formulas.

$$p_{sc} = \eta_{imp} p_i, \quad (3.6.)$$

kur η_{imp} – impulsa pārveidotāja lietderības koeficients.

Strāva impulsa pārveidotāja SC pusē, kas iestatāma strāvas avotam I_1 , tiek aprēķināta kā:

$$i_{sc} = \frac{p_{sc}}{v_{sc}}, \quad (3.7.)$$

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 reģenerēties, izkļiedējas siltumā. Attiecīgais algoritms ņem vērā spriegumu uz kondensatora *C* elementa, uz kura ir faktiskais *SC* slēguma uzlādes stāvokļa spriegums. Iekšējās pretestības *R* dēļ uzlādes gadījumā ar voltmetru izmērītais *SC* slēguma spriegums ir nedaudz augstāks par faktisko, savukārt izlādes gadījumā – zemāks, taču detalizētāks ieskats par atšķirībām starp *SC* slēguma faktisko un voltmetra izmērīto spriegumu sniegts 4. nodaļā.

SC EUS izlādes gadījumā var definēt nosacījumu, kas nosaka, kāda daļa no pilnās piedziņas jaudas tiek ņemta no apakšstacijas, kāda – no *SC* EUS. Šādā gadījumā strāvas avotam I_1 iestatāmo strāvu aprēķina pēc 3.8. formulas.

$$i_2 = \frac{kp_d}{v_d} = \frac{p_2}{v_d}. \quad (3.8.)$$

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, ņemot vērā zudumus impulsu pārveidotājā un invertorā, pēc 3.9. formulas.

$$p_{sc} = \frac{p_2}{\eta_{inv}\eta_{imp}}. \quad (3.9.)$$

Strāvas avotam I_2 iestatāmās strāvas aprēķina formula ir vienāda ar 3.7. 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.

3.2. Rekuperētās enerģijas apjoma noskaidrošana

Tā kā smagāks transportlīdzeklis rekuperē vairāk elektriskās enerģijas un vieglāks - mazāk, ekonomiskas mobilas EUS plānošanā par galveno nosacījumu tika izvirzīta iespēja akumulēt tādu elektriskās enerģijas apjomu, kādu attiecīgais transportlīdzeklis, būdams noslogots ar maksimālo pasažieru skaitu, rekuperē, bremzējot no maksimāli atļautā kustības ātruma 50 km/h. Šīs rekuperētās enerģijas apjoma noskaidrošana ir pirmais uzdevums pirms mobilas EUS mērogošanas aprēķiniem. Transportlīdzekļa rekuperētās enerģijas uzkrāšana bieži tiek uzskatīta par tā kinētiskās enerģijas, kas tiek aprēķināta pēc 3.10. formulas, atgūšanu.

$$E_k = \frac{mV^2}{2} \left(\frac{1}{3600000} \right), \quad (3.10.)$$

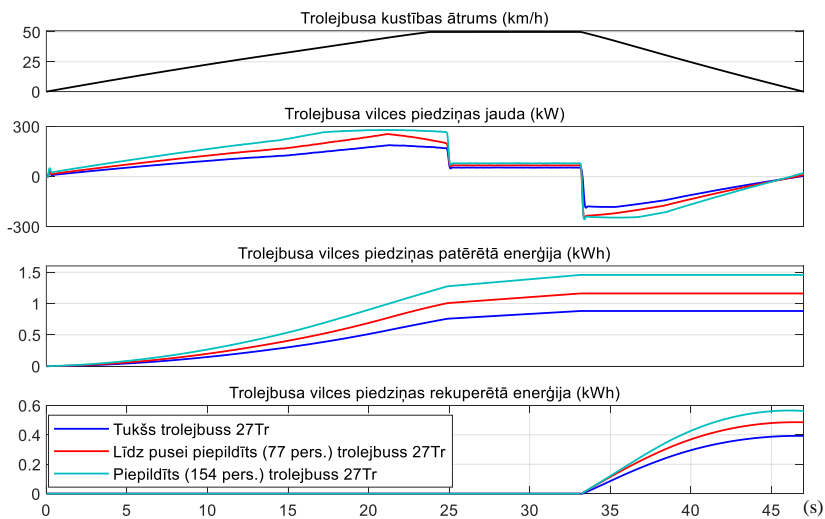
kur E_k – transportlīdzekļa kinētiskā enerģija, kWh;

m – transportlīdzekļa masa, kg;

V – transportlīdzekļa kustības ātrums, pie kura sākas bremzēšana, m/s.

Tomēr faktiskā rekuperētā jeb atgūtā enerģija vienmēr ir mazāka par 3.10. formulai atbilstošo kinētisko enerģiju sakarā ar dažādu veidu zudumiem, ko izraisa, piemēram, rites pretestība, gaisa pretestība, termiskie zudumi vilces dzinējā utt. Mēģinot paredzēt transportlīdzekļa aptuvenu rekuperētās enerģijas apjomu, aprēķinātā kinētiskā enerģija bieži tiek dalīta ar noteiktiem koeficientiem, pieņemot, ka visu laiku noteikta procentuāla daļa no kinētiskās enerģijas tiek zaudēta, neatkarīgi no transportlīdzekļa noslodzes [43]. Tāpēc ar simulāciju palīdzību tika nolemts papildus noskaidrot, kādu ietekmi transportlīdzekļa masa atstāj uz bremsēšanas laikā atgūtās elektriskās enerģijas apjomu, t.i. par kādu apjomu rekuperētā enerģija ir mazāka salīdzinājumā ar teorētiski atbilstošo kinētisko enerģiju.

Vispirms *Matlab/Simulink* vidē, pieņemot, ka viena pasažiera vidējā masa ir 75 kg, tika veiktas trolejbusa 27Tr bez pasažieriem, 27Tr ar 50 % aizpildītām pasažieru vietām (77 pers.), un pilnībā ar pasažieriem piepildīta 27Tr (154 pers.) kustības cikla simulācijas ar aptuveni 400 m kopējo nobraukumu, kas iekļauj paātrināšanos līdz 50 km/h, neilgu vienmērīgu kustību un bremsēšanu. Visiem gadījumiem bija vienādas formas kustības ātruma līknes, kā redzams 3.6. attēlā, kur parādītas arī piedziņas jaudu, patērēto enerģiju un rekuperēto enerģiju līknes. Paātrināšanās laikā pieprasītās jaudas patēriņš pieaug, līdz sasniedz maksimumu paātrināšanās beigās. Pēc tam, vienmērīgas kustības sākumā jaudas patēriņš samazinās ar strauju kritienu un turpmāko kustības laiku ir vienmērīgs. Bremsēšanas režīma sākumā piedziņas jauda ar strauju kritienu samazinās zem nulles, un negatīva jauda nepārprotami nozīmē rekuperācijas režīmu.

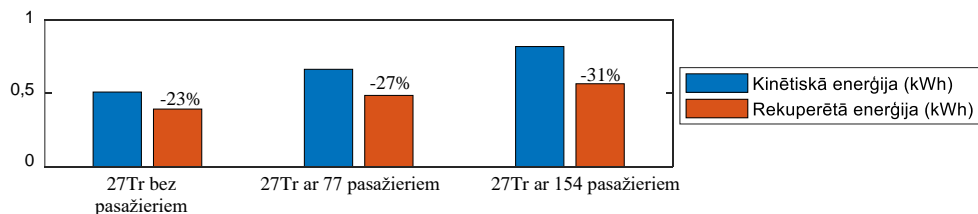


3.6. att. 27Tr kustības simulāciju rezultātu diagrammas.

3.7. attēlā redzami kinētisko un rekuperēto enerģiju apjomu salīdzinājumi situācijām, kad bremsēšana notiek no 50 km/h sākotnējā kustības ātruma. Kinētiskās enerģijas aprēķinātas ar 3.10. formulu, bet rekuperētās enerģijas atbilst rekuperēto enerģiju diagrammu pēdējām vērtībām no 3.6. attēla. Var redzēt, ka tukšu, pustukšu un pilnu trolejbusu rekuperēto enerģiju atšķirības no atbilstošajām kinētiskajām enerģijām nav vienādas. Pēc esošā 27Tr trolejbusa virtuālā modeļa simulāciju rezultātiem var redzēt, ka jo trolejbuss ir smagāks, jo mazāka daļa

no tā kinētiskās enerģijas tiek atgūta rekuperētas elektriskās enerģijas veidā. Taču kopumā jāreķinās, ka rekuperētās enerģijas apjoms ir vidēji par vismaz 20 – 30 % mazāks par kinētiskās enerģijas apjomu. Pilnīgi precīzu atšķirību noskaidrošanas gadījumā būtu nepieciešams veikt testus uz reāla trolejbusa, mērot rekuperētās enerģijas apjomus bremsēšanas laikā pie dažādiem pasažieru skaitiem, pirms tam nomērot trolejbusa pilno masu.

27Tr kinētisko enerģiju diagrammas pie 50 km/h un rekuperēto enerģiju diagrammas, bremsējot no 50 km/h (kWh)



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

3.3. Rekuperētās enerģijas uzkrāšanai paredzētas mobilas superkondensatoru EUS plānošana un aprēķināšana

Par mobilas EUS SC elementiem tika izvēlētas Maxwell BCAP3400 P300 K04/05 sērijas 3V 3400F šūnas, kas izlaistas aprītē 2019. gada janvārī, un kuru galvenie parametri redzami 3.1. tabulā [41]. Šī cilindruveida šūna arī patlaban – 2024. – gadā ir pats jaunākais modelis, kas seko aiz iepriekšējiem 2,7 V 3000 F un 2,85 V 3400 F šūnu modeļiem, kuri redzami 3.8. attēlā.

Vispirms tiks parādīts, kā tiek aprēķināta tāda SC EUS, kuras enerģijas ietilpība ir vienāda ar attiecīgā transportlīdzekļa reģenerētās elektriskās enerģijas apjomu.



3.8. att. Cilindrveida superkondensatoru šūnu modeļi.

3.1. tabula

Izvēlētā superkondensatora BCAP3400 P300 K04/05 parametri

Sākotnējā kapacitāte	3400 F
Sākotnējā ekvivalentā pretestība	0,24 mΩ
Maksimālais nominālais spriegums	3 V
Maksimālā darba strāva	2800 A
Īpatnējā siltumietilpība	580 J/°C
Termālā pretestība	3,2 °C/W
masa	496 g
Nominālā darba temperatūra	25 °C
Maksimālā darba temperatūra	65 °C

Lai vienkāršotu līdzstrāvas impulsu pārveidotāja topoloģiju, minimālais EUS uzlādes stāvokļa spriegums tika noteikts kā puse no maksimālā EUS darba sprieguma. Līdz ar to

izmantojamā SC EUS ietilpība ir 75 % no pilnās ietilpības [45]. Lai noskaidrotu nepieciešamo EUS SC šūnu skaitu, rekuperētās enerģijas apjoms tika salīdzināts ar dažāda skaita SC šūnu kombināciju izmantojamām ietilpībām E_{SC_N} , kas tiek aprēķinātas ar formulu:

$$E_{SC_N} = \frac{C_N(V_{\max_N}^2 - V_{\min_N}^2)}{2} \left(\frac{1}{3600000} \right), \quad (3.11.)$$

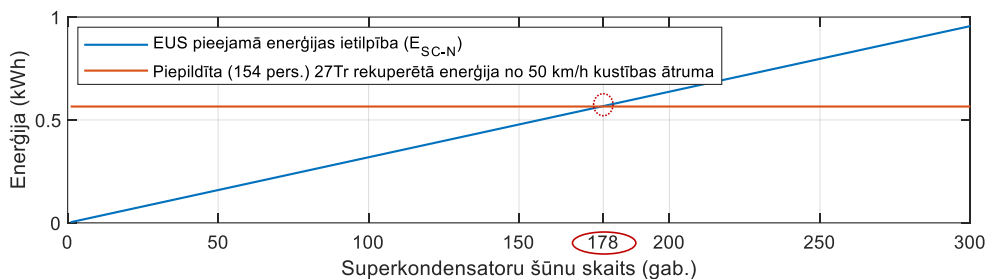
kur N – SC šūnu skaits, gab.;

C_N – kopējā kapacitāte N šūnu slēgumam, F;

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

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

Izmantojot 3.11. formulu, var aprēķināt E_{SC_N} slēgumiem ar dažādu SC skaitu. Rezultātus attēlo tabulā, kurā sameklē E_{SC_N} , kas atbilst transportlīdzekļa rekuperētās enerģijas apjomam un nolasa SC šūnu skaitu. E_{SC_N} līkne kā funkcija no SC šūnu skaita redzama 3.9. attēlā, kur iekļauta arī līkne, kas atbilst enerģijai, rekuperētai no 50 km/h sākotnējā ātruma. Punktā, kur krustojas reģenerētās enerģijas līkne ar E_{SC_N} līkni, var nolasīt attiecīgo SC šūnu skaitu. Redzams, ka 27Tr gadījumā pie 0,565 kWh rekuperētās enerģijas, ir vajadzīgas 178 SC šūnas, jo to izmantojamā energoietilpība arī ir 0,565 kWh.



3.9. att. EUS1 SC slēguma nepieciešamā SC šūnu skaita noteikšana.

EUS SC var saslēgt virknes slēgumā vai arī paralēlos slēgumos ar vienādu skaitu SC katrā zarā. Izvēle ir atkarīga no izvirzītiem nosacījumiem kā, piemēram, vai mērķis ir pēc iespējas augstāks vai zemāks SC slēguma maksimālais darba spriegums, vai arī vājāka caur SC plūstošā strāva. Ja, piemēram, četras SC šūnas saslēdz virknē, ķēdes kopējā strāva ir vājāka un kopējais spriegums augstāks, bet ja to pašu slēgumu pārveido par divu virknes slēgumu paralēlslēgumu, tad ir divas reizes mazāks kopējais spriegums un divas reizes stiprāka ķēdes kopējā strāva. Līdz ar to plūstošās jaudas abiem SC slēgumiem ir vienādas.

Elektriskā transporta EUS impulsu pārveidotājs var funkcionēt tad, ja spriegums patērētāja, t.i. tīkla jeb piedziņas pusē ir augstāks. Atkarībā no attāluma starp transportlīdzekli un apakšstaciju, intensīvas paātrināšanās laikā kontakttīkla spriegums elektropārvades pretestības dēļ no 600 V var nokristies zem 450 V. Tāpēc tika nolemts, ka turpmākos simulāciju eksperimentos jebkādas plānojamas EUS maksimālais uzlādes spriegums nebūs augstāks par 450 V. 3.2. tabulā parādīti parametri iepriekš noteiktajai EUS ar 178 SC šūnām (3.4. att.), kuras ir saslēgtas paralēlslēgumā ar 89 šūnām katrā zarā, jo ja visas 178 šūnas saslēdz virknē, tad

ķēdes maksimālais spriegums iznāk 534 V, kas ir samērā riskanti pie augstu kontakttīkla sprieguma kritumu iespējamības.

EUS aprēķinos tika ņemta vērā arī papildus masa, kas trolejbusu padara smagāku. Tika pieņemts, ka impulsu pārveidotāja masa ir 200 kg, ieskaitot droseles. Ja plāno, ka EUS sastāv no atsevišķām SC šūnām, tad EUS masas aprēķinā jāņem vērā arī papildus aprīkojuma masa uz vienu SC šūnu. Par piemēru tika ņemts 3.10. attēlā redzamais 125V 63F Maxwell BMOD0063-125 modulis, kas sver 61 kg un sastāv no 48 atsevišķām SC šūnām [46].



3.10. att. Superkondensatoru modulis 125V 63F Maxwell BMOD0063-125.

Ja vienas atsevišķas SC šūnas masa ir 520 g, tad 48 SC šūnu kopējā masa ir aptuveni 25 kg. No tā izriet, ka uz vienu 520 g SC šūnu ir vēl papildus 750 g, kas iekļauj dažādas kopnes, stiprinājumus, sprieguma balansēšanas ķēdes, dzesēšanas un ventilācijas sistēmas utt., tāpēc turpmāk tiks pieņemts, ka papildus aprīkojuma masa uz katru atsevišķu SC šūnu ir 750 g. Ieskaitot impulsu pārveidotāju, pilnā EUS masa aprēķināma pēc formulas:

$$m_{EUS} = N(m_{sc} + m_d) + m_{imp}, \quad (3.12.)$$

kur N – SC šūnu skaits, gab.;

m_{sc} – vienas SC šūnas masa, kg;

m_d – papildus aprīkojuma masa uz vienu SC šūnu, kg;

m_{imp} – impulsu pārveidotāja masa, kg.

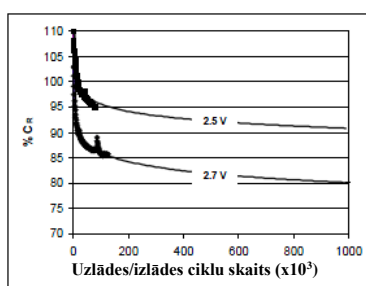
3.2. tabula

27Tr SC EUS1, kuras energoietilpība vienāda ar 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)
27 Tr EUS1	178	267	133,5	76,4	0,01068	0,567	88,288	422

Diemžēl ir jāreķinās arī ar tādu neizbēgamu procesu, kā SC elektrisko parametru degradēšanās. Tas nozīmē, ka SC ekspluatācijas laikā to iekšējā pretestība palielinās, kas rezultējas ar lielākiem iekšējiem zudumiem uzlādes/izlādes laikā, savukārt to kapacitāte samazinās, kas attiecīgi rezultējas ar energoietilpības samazināšanos. No tā var izdarīt secinājumu, ka izvēloties iepriekš aprēķināto EUS1, kuras energoietilpība ekspluatācijas sākumā ir vienāda ar rekuperētās enerģijas apjomu, samazinoties kapacitātei jeb energoietilpībai, EUS uzlādēsies arvien ātrāk pirms bremsēšanas režīma beigām un līdz ar to arvien vairāk rekuperētās enerģijas tiks izkliedēta bremsu rezistoros.

Saskaņā ar Maxwell sniegto informāciju SC šūnu iekšējā pretestība viena miljona uzlādes/izlādes ciklu laikā palielinās lineāri par 100 %, bet SC šūnu kapacitāte C darbmūža laikā samazinās nelineāri. 3.6. attēlā redzamas ražotāja informatīvā materiālā atrodamas SC kapacitātes izmaiņas diagrammas 2,5 V 2600 F un 2,7 V 3000 F šūnām nominālā 25 °C darba temperatūrā [47]. Taču saskaņā ar informāciju, kāda atrodama tehniskajā dokumentācijā, kapacitāte turpmāk aplūkotojām 3 V 3400 F šūnām viena miljona uzlādes/izlādes ciklu laikā samazinās par 25 %, bet vadoties pēc desmit gadu kalpošanas laika, nevis tīri ciklu skaita – par 20 %. Ņemot vērā to, ka SC slēgums neizlādējas līdz nullei, bet līdz spriegumam, kas ir 25 % no maksimālā sprieguma, turpmāk darbā tika pieņemts, ka izmantoto SC šūnu kapacitāte viena miljona uzlādes/izlādes ciklu laikā samazinās par 20 % saskaņā ar tādu pašu līkni, kā 3.11. attēlā 2,7 V 3000 F šūnām.



3.11. att. SC elementu kapacitātes procentuālā samazināšanās līkne darbmūža laikā.

Ir vērts atzīmēt, ka visa rekuiperētā enerģija nenonāk līdz SC slēgumam, jo vispirms tā iziet cauri vilces piedziņas invertoram un pēc tam – cauri EUS impulsu pārveidotājam, kā parādīts vēlāk 3.14. attēlā, un abās iekārtās daļa rekuiperētās enerģijas tiek zaudēts iekšējo zudumu veidā. Tomēr turpmākie aprēķini pierādīs, ka sakarā ar zudumiem minētajās iekārtās tikai ekspluatācijas sākuma fāzē EUS1 neuzlādējas līdz maksimumam pirms bremsēšanas režīma beigām, jo pēc zināma izmantošanas laika energoietilpības samazināšanās atstāj manāmāku ietekmi, kuras rezultātā palielinās bremžu rezistoros izkliedētās enerģijas apjoms. Līdz ar to tika ieteikta rekomendācija plānot tādu SC ķēdi jeb EUS2, kuras sākotnējā energoietilpība ir par noteiktu rezerves apjomu augstāka par līdz šim aprēķinātās EUS1 energoietilpību ar tādu mērķi, lai visa darbmūža laikā SC ķēdes energoietilpība nesamazinātos zem nepieciešamā apjoma. Starpību d , par kādu jaunās EUS2 SC ķēdes kapacitātei C jābūt augstākai par iepriekš aprēķinātās EUS1 kapacitāti, ņemot vērā EUS1 kapacitātes C samazināšanos, vilces piedziņas invertora un impulsu pārveidotāja lietderības koeficientus η_{inv} un η_{imp} , var aprēķināt pēc formulas:

$$d = C + (nC - (1 - \eta_{inv}\eta_{imp})C) = C(n + \eta_{tot}), \quad (3.13.)$$

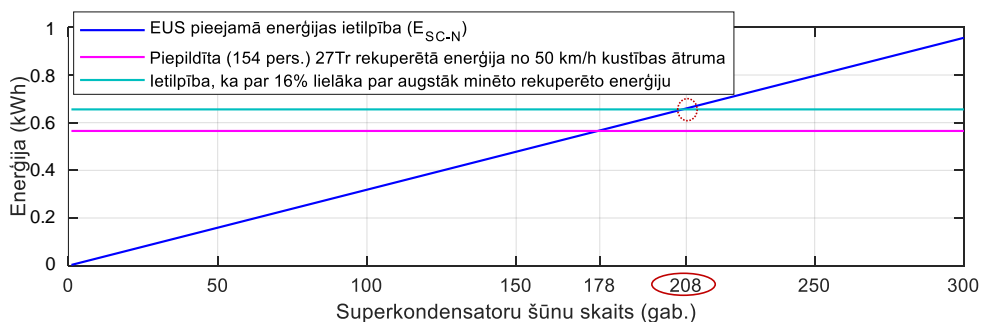
kur $n = 0,2$ – kapacitātes C samazināšanās apjoma koeficients;

η_{tot} – piedziņas invertora un impulsu pārveidotāja pilnais lietderības koeficients, kas vienāds ar η_{inv} un η_{imp} reizinājumu.

3.13 formulā tiek ņemts vērā iepriekš minētais kapacitātes C samazinājums par 20 %, tāpēc arī koeficients $n = 0,2$. Pieņemot, ka gan piedziņas invertoram, gan impulsu pārveidotājam maksimālā efektivitāte var būt 98 %, t.i. $\eta_{inv} = \eta_{imp} = 98 \%$, tad pēc 3.13. formulas $d = 16 \%$. Tas nozīmē, ka jaunās EUS2 kapacitātei un līdz ar to arī energoietilpībai jābūt par 16 % augstākai salīdzinājumā ar EUS1 gadījumu, un skaitliski EUS2 energoietilpība ir $E_{EUS2} \approx 0,66$ kWh, kuru var aprēķināt arī pēc šādas formulas, kur E_r ir rekuperētā enerģija:

$$E_{EUS2} = E_r + dE_r = E_r(1 + d). \quad (3.14.)$$

Saskaņā ar 3.12. attēlu, kur veikta EUS2 nepieciešamā šūnu skaita noskaidrošana, E_{SC_N} līkne krustojas ar E_{EUS2} līkni pie 208 SC šūnām, kas ir par 30 vairāk salīdzinājumā ar 178 pie EUS1. Savukārt EUS2 elektriskie parametri, kas tiks izmantoti turpmākajos aprēķinos un simulācijās, redzami 3.3. tabulā.



3.12. att. EUS2 SC slēguma nepieciešamā SC šūnu skaita noteikšana.

3.3.tabula

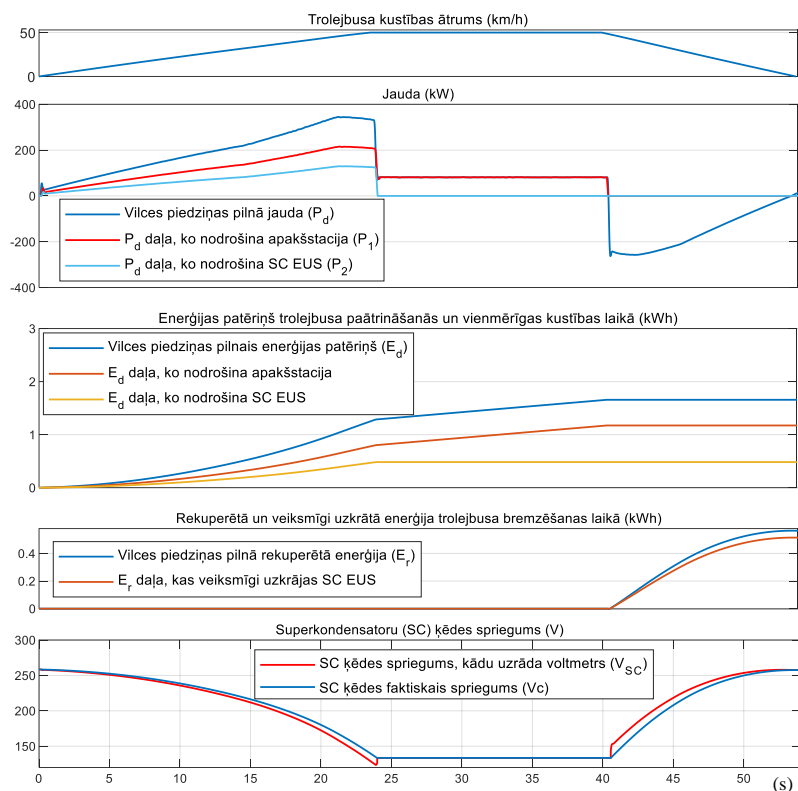
27Tr EUS2, kuras ietilpība ir par 16% lielāka par rekuperētās enerģijas apjomu, parametri

	N	V_{max} (V)	V_{min} (V)	C (F)	Aktīvā pretestība (Ω)	Izmantojamā ietilpība (kWh)	SC šūnu masa (kg)	EUS pilnā masa (kg)
27Tr EUS2	208	312	156	65,38	0,01248	0,663	103	459

3.4. Rekuperētās enerģijas izmantošanas efektivitātes aprēķināšana ar vidējo strāvu metodi

Ar virsrakstā minēto terminu “izmantošanas efektivitāte” domāta pilnā efektivitāte rekuperētās enerģijas uzkrāšanai trolejbusa bremzēšanas režīma laikā un pēc tam sekojošai izmantošanai trolejbusa nākamā ieskrējiena laikā. 3.13. attēlā piemēra pēc parādīti simulācijas rezultāti EUS1 gadījumam, kas iekļauj paātrināšanos līdz 50 km/h, vienmērīgu kustību un bremzēšanu. Simulāciju rezultāti atbilst gadījumam ar jaunu, nelietotu EUS1 un iekārtu lietderības koeficientiem $\eta_{inv} = \eta_{imp} = 98 \%$. Paātrināšanās režīma piedziņu ar jaudu apgādā gan apakšstacija, gan SC EUS tā, ka tieši paātrināšanās režīma beigās, t.i. pie 50 km/h ātruma sasniegšanas SC EUS ir izlādējies tieši līdz minimāli pieļaujamajam uzlādes stāvokļa spriegumam $V_{min} = 133,5$ V. Piedziņas pilnās jaudas līkne ir vienāda ar no apakšstacijas ņemtās jaudas P_1 un no SC EUS ņemtās jaudas P_2 līkņu summu. Jāpiebilst, ka attēlotā no apakšstacijas

ņemtā jauda P_1 nav pilnā apakšstacijas jauda, bet gan tikai tā daļa, kas veiksmīgi nonākusi līdz piedziņai. Šoreiz netiek aplūkota elektropārvadē zaudētā jauda, kas atkarīga no attāluma starp apakšstaciju un trolejbusu un iekļaujama pilnajā apakšstacijas jaudā. Tā kā pieņemts, ka sākotnēji pieejamās SC EUS enerģijas apjoms ir vienāds ar to, kādu EUS veiksmīgi uzkrāj, kad trolejbuss bremzē no 50 km/h, tad konkrētajā situācijā attiecīgi SC slēguma sprieguma līknes sākuma un beigu punktos ir ar vienādām vērtībām.

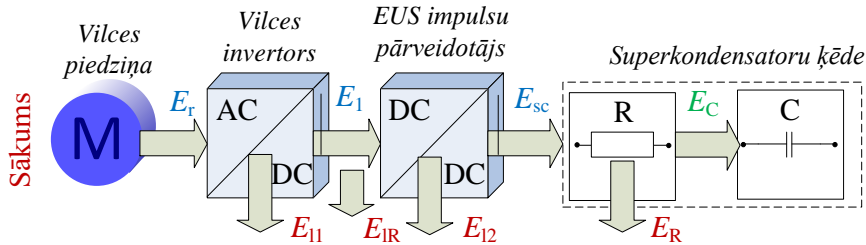


3.13. att. Trolejbusa ar mobilu EUS1 kustības simulācijas rezultāti.

Rekuperētās enerģijas utilizēšanas jeb pilno uzlādes/izlādes procesa efektivitāti var aprēķināt kā paātrinājuma laikā veiksmīgi izmantotās SC EUS enerģijas (E_2 no 3.16. att.) un iepriekšējā bremzēšanas režīma pilnās rekuperētās enerģijas E_r dalījumu. Tomēr šāda veida simulāciju veikšana, piemēram, pie dažādām invertora un impulsu pārveidotāja efektivitātēm aizņem zināmu laiku. Tāpēc tika izstrādāta metode, ar kuras palīdzību attiecīgos rezultātus iegūst aprēķinu veidā bez simulāciju veikšanas. Pirms aprēķiniem ir nepieciešams veikt tikai vienu simulāciju, lai noskaidrotu, kādu enerģijas apjomu trolejbusa piedziņa patērē, paātrinoties līdz 50 km/h ātrumam, un kādu enerģijas apjomu piedziņa rekuperē, bremzējama no 50 km/h. SC uzlādes un izlādes strāvas pie mainīgiem trolejbusa kustības ātrumiem ir mainīgas, kā redzams vēlāk 3.15. un 3.17. attelā. Taču turpmāk aprakstītie aprēķini balstīsies uzlādes/izlādes strāvu vidējo vērtību izmantošanā.

3.4.1. Mobilas superkondensatoru EUS uzlādes efektivitāte

Trolejbusa piedziņas bremsēšanas režīma laikā rekuperētā enerģija E_r tiek novadīta SC EUS virzienā ar mērķi to uzkrāt. Tomēr SC uzlādes procesa laikā daļa no E_r tiek zaudēta. Uzlādes procesu var sadalīt vairākos posmos, kā redzams 3.14. attēlā attēlotajā shēmā ar E_r plūsmas ceļu līdz SC EUS. Rezistors R simbolizē SC ķēdes iekšējo pretestību.



3.14. att. Rekuperētās enerģijas ceļš no piedziņas līdz superkondensatoru ķēdei.

Piedziņas pilnā rekuperētā enerģija E_r vispirms iet cauri piedziņas invertoram, kurā noteikta daļa E_{I1} tiek zaudēta invertora zudumu dēļ. Ja pieņem, ka invertora lietderības koeficients ir η_{inv} , tad enerģijas apjomam, kas veiksmīgi iziet tam cauri, atbilst izteiksme:

$$E_1 = E_r - E_{I1} = E_r - (1 - \eta_{inv})E_r. \quad (3.15.)$$

3.14. attēlā E_{IR} ir izkļaidētā enerģija bremsu rezistorā, kurš atrodas līdzstrāvas posmā starp piedziņas invertoru un EUS impulsu pārveidotāju. Taču enerģijas izkļaidēšanās bremsu rezistorā ir aktuāla tikai tad, ja SC spriegums sasniedzis maksimālo vērtību pirms trolejbusa bremsēšanas jeb enerģijas rekuperācijas režīma beigām, par ko sīkāk tiks aprakstīts vēlāk.

Caur invertoru izgājušī enerģija E_1 tālāk iet cauri EUS impulsu pārveidotājam, kurā noteikta daļa E_{I2} tiek zaudēta pārveidotāja zudumu dēļ. Ja pieņem, ka pārveidotāja lietderības koeficients ir η_{imp} , tad enerģijas apjomam, kas veiksmīgi iziet cauri pārveidotājam, atbilst izteiksme:

$$E_{sc} = E_1 - E_{I2} = E_1 - (1 - \eta_{imp})E_1. \quad (3.16.)$$

Tātad E_{sc} ir uzskatāma par rekuperētās enerģijas E_r daļu, kas caur piedziņas invertoru un EUS impulsu pārveidotāju veiksmīgi nokļuvusi līdz SC slēgumam. Turklāt 3.15. un 3.16. formulas var apvienot, iegūstot īsāku aprēķina formulu enerģijai E_{sc} , kur E_r tiek reizināta ar invertora un impulsu pārveidotāja kopējo efektivitāti η_{tot} :

$$E_{sc} = E_r \eta_{inv} \eta_{imp} = E_r \eta_{tot}. \quad (3.17.)$$

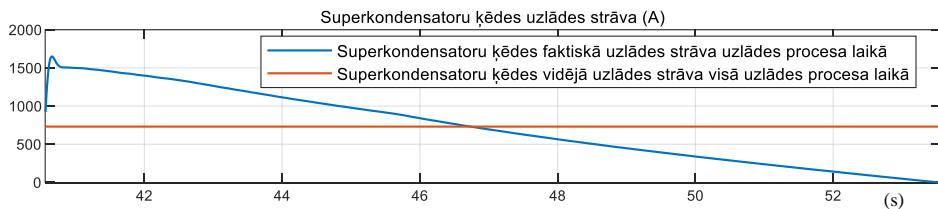
Tomēr jāpiebilst, ka 3.17. formula ir izmantojama tikai mobilas SC EUS gadījumā, kad posmā starp invertoru un impulsu pārveidotāju pārvades pretestību var neievērot. Bez tam E_{sc} vēl nav veiksmīgi uzkrātā enerģija, jo tā sastāv no divām daļām, no kurām E_c ir veiksmīgi uzkrātā enerģija, un E_R ir SC iekšējās pretestības R dēļ zaudētā enerģija:

$$E_{sc} = E_c + E_R. \quad (3.18.)$$

Kā redzams, ja E_r , η_{inv} un η_{imp} ir zināmi, tad nav problēmu aprēķināt E_{sc} , taču nākamais jautājums ir, kā aprēķināt enerģijas E_c un E_R , neveicot simulācijas. E_c ir jāaprēķina, lai varētu aprēķināt uzlādes procesa efektivitāti kā attiecību starp E_c un E_r :

$$\eta_{uz} = \frac{E_c}{E_r}. \quad (3.19.)$$

Lai arī uzlādes procesā caur SC plūstošā strāva ir mainīga, priekš tuvinātu skaitlisku aprēķinu veikšanas tika nolemts pieņemt, ka visa uzlāde notiek ar konstantu strāvu. Tas nozīmē visu uzlādes procesa mainīgo strāvu aizvietot ar konstantu strāvu, kā redzams 3.15. attēlā, kur konstantā strāva (sarkanā līkne) atbilst visu faktisko strāvas vērtību (zilā līkne) vidējai vērtībai visā uzlādes procesa laikā. Jāpiebilst gan, ka faktiskā caur vienu SC šūnu plūstošā strāva ir divas reizes mazāka par 3.15. attēlā redzamajām, atceroties un atsaucoties uz to, ka SC slēgumu veido divu virknes zaru paralēlslēgums.



3.15. att. Superkondensatoru ķēdes strāva uzlādes laikā.

Pieņemot, ka SC slēgums ar kapacitāti C un sākotnējo spriegumu V_1 uzlādējas ar konstantu strāvu līdz spriegumam V_2 laikā t , no vispārīgās fizikas zināms, ka šīs konstantās uzlādes strāvas aprēķina formula ir:

$$I_{uz} = \frac{C(V_2 - V_1)}{t}. \quad (3.20.)$$

Vidējās strāvas vērtība, kas aprēķināta pēc 3.20. formulas, un vidējās strāvas vērtība, kas aprēķināta kā 3.10. attēlā redzamās faktiskās strāvas (zilā līkne) vidējā vērtība, savā starpā atšķiras ne vairāk par $\pm 1\%$ saistībā ar nenozīmīgām simulācijas kļūdām.

Ja SC slēgums uzlādējas no V_1 līdz V_2 , tad 3.18. izteiksmē E_c var aizvietot ar atbilstošu uzkrātās enerģijas aprēķināšanas formulu, savukārt E_R var aizvietot ar atbilstošu aktīvās pretestības R dēļ izkliedētās enerģijas aprēķināšanas formulu šādi:

$$E_{sc} = E_c + E_R = \frac{C(V_2^2 - V_1^2)}{2} + \left(\frac{C(V_2 - V_1)}{t}\right)^2 Rt. \quad (3.21.)$$

Vienkāršojot 3.21. izteiksmi, var iegūt:

$$E_{sc} = \frac{C((V_2^2 - V_1^2)t + (V_2 - V_1)^2 CR)}{2t}. \quad (3.22.)$$

3.21. un 3.22. izteiksmēs vienīgais nezināmais lielums ir SC uzlādes procesa beigu spriegums V_2 . Ir iespējams pārlielināties, vai konkrētajā situācijā SC slēgums uzlādējas līdz maksimāli pieļaujamajam spriegumam $V_{\max} = 267$ V, vai nē. Lai to izdarītu, aprēķinot pilno enerģiju SC pusē pie maksimāli pieļaujamā uzlādes līmeņa, 3.21. un 3.22. izteiksmēs V_2 aizstāj ar V_{\max} . Ja $E_1 > E_{sc}$, tad SC slēgums uzlādējas līdz maksimāli pieļaujamajam spriegumam V_{\max} . Līdz ar to starpība starp E_1 un E_{sc} ir enerģijas daļa, kas pēc V_{\max} sasniegšanas tiek novadīta uz bremžu rezistoru un izkliedējas:

$$E_{1R} = E_1 - E_{sc}. \quad (3.23.)$$

Ja $E_1 < E_{sc}$, tad SC slēgums neuzlādējas līdz maksimāli pieļaujamajam spriegumam V_{\max} , tāpēc no 3.22. izteiksmes ir jāizved V_2 aprēķināšanas formula, ko var izdarīt, vienādojot saucējus un rezultātā iegūstot kvadrātvienādojumu V_2 aprēķinam:

$$C(t + 2CR)V_2 - 4C^2RV_1V_2 + 2C^2RV_1^2 - CtV_1^2 - 2E_{sc}t = 0. \quad (3.24.)$$

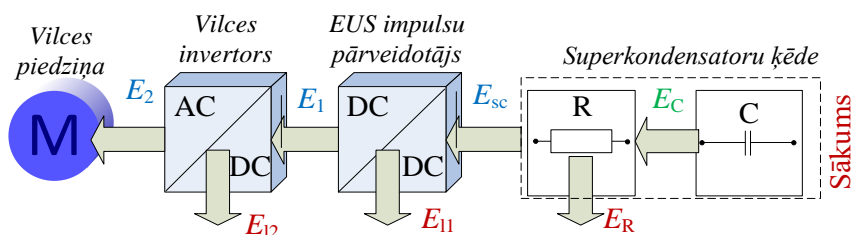
3.24. kvadrātvienādojuma saknei, kas atbilst faktiskajai V_2 vērtībai, ir plusa zīme pirms kvadrātsaknes izteiksmes:

$$V_2 = \frac{4C^2RV_1 + \sqrt{(4C^2RV_1)^2 - 4C(t + 2CR)(2C^2RV_1^2 - CtV_1^2 - 2E_{sc}t)}}{2C(t + 2CR)}. \quad (3.25.)$$

Piemēram, 3.13. attēla simulācijas rezultātos SC slēguma spriegums uzlādes beigās bija $V_2 = 257,55$ V, savukārt saskaņā ar 3.25. formulu $V_2 = 258,38$ V. V_2 vērtība, kas aprēķināta ar 3.25. formulu, un V_2 vērtība, kas iegūta reāllaika simulācijā, atšķiras par mazāk nekā 1 % sakarā ar nenozīmīgām simulācijas procesa kļūdām. Līdz ar to izvestā 3.25. formula ir pareiza.

3.4.2. Mobilas superkondensatoru EUS izlādes efektivitāte

Arī SC izlādes procesa laikā pastāv dažādi enerģijas zudumi līdzīgi kā uzlādes gadījumā, bet pretējā secībā. Izlādes procesu var sadalīt vairākos posmos, kā redzams 3.16. attēlā, kur redzams no SC ņemtās enerģijas plūsmas ceļš līdz trolejbusa piedziņai.



3.16. att. Superkondensatoros uzkrātās enerģijas ceļš līdz vilces piedziņai.

Tika pieņemts, ka visā trolejbusa ātruma uzņemšanas laikā t no SC EUS ņemtajai enerģijai bija viena un tā pati procentuālā daļa no pilnās piedziņai nepieciešamās enerģijas līdzīgi kā redzams iepriekš 3.13. attēlā. Turklāt tieši paātrināšanās režīma beigās, proti, pie 50 km/h

ātruma sasniegšanas SC slēgums ir izlādējies līdz minimāli pieļaujamajam spriegumam. Iepriekš uzlādes procesā par enerģijas avotu bija uzskatāma trolejbusa vilces piedziņa, taču izlādes gadījumā enerģijas avots ir superkondensatoru slēgums jeb precīzāk – elements C 3.16. attēlā. Tā kā izlādes procesā SC slēguma beigu spriegums V_2 ir zemāks par sākotnējo spriegumu V_1 , tad, lai enerģiju aprēķināšanas skaitliskajiem rezultātiem būtu pozitīvas skaitliskās vērtības, pilno no SC izlādēto enerģiju E_c aprēķināsim pēc formulas:

$$E_c = \frac{C(V_1^2 - V_2^2)}{2}. \quad (3.26.)$$

Līdzīgi, lai vidējās izlādes strāvas I_{iz} vērtības skaitliskais rezultāts būtu ar plusa zīmi, aprēķinam tiks izmantota formula ar sākotnējā sprieguma V_1 un beigu sprieguma V_2 starpību:

$$I_{iz} = \frac{C(V_1 - V_2)}{t}. \quad (3.27.)$$

3.26. un 3.27. formulās spriegums V_1 ir zināms, kā iepriekšējā uzlādes režīma beigu spriegums, t.i. $V_1 = 258,38$ V, un V_2 arī ir zināms, kā SC slēguma minimāli pieļaujamais spriegums, t.i. $V_2 = 133,5$ V. Līdz EUS impulsu pārveidotājam nonākušajai enerģijai E_{sc} atbilstošā formula no 3.21. un 3.22. formulām atšķiras ar to, ka SC slēguma iekšējās pretestības R dēļ zaudētā enerģija E_R tiek atņemta no E_c :

$$E_{sc} = E_c - E_R = \frac{C(V_1^2 - V_2^2)}{2} - \left(\frac{C(V_1 - V_2)}{t}\right)^2 Rt, \quad (3.28.)$$

$$E_{sc} = E_c - E_R = \frac{C((V_1^2 - V_2^2)t - (V_1 - V_2)^2 CR)}{2t}. \quad (3.29.)$$

Caur EUS impulsu pārveidotāju izgājušo enerģiju E_1 var aprēķināt kā:

$$E_1 = E_{sc} - (1 - \eta_{imp})E_{sc}. \quad (3.30.)$$

Tālāk var aprēķināt caur invertoru izgājušo enerģiju E_2 :

$$E_2 = E_1 - (1 - \eta_{inv})E_1. \quad (3.31.)$$

Turklāt E_2 var aprēķināt arī pēc:

$$E_2 = E_{sc}\eta_{imp}\eta_{inv} = E_{sc}\eta_{tot}. \quad (3.32.)$$

Tomēr arī šeit jāpiebilst, ka 3.31. un 3.32. formulas nevar izmantot stacionāras EUS gadījumā, kad starp impulsu pārveidotāju un piedziņas invertoru ir vēl pārvades pretestība. Tātad E_2 ir uzskatāma par enerģijas daļu, kas izlādes laikā veiksmīgi nonāk līdz trolejbusa piedziņai. Izlādes procesa efektivitāti var aprēķināt kā E_2 un E_c dalījumu:

$$\eta_{iz} = \frac{E_2}{E_c}. \quad (3.33.)$$

Pilno uzlādes/izlādes procesa efektivitāti var aprēķināt kā līdz piedziņai nonākušās enerģijas E_2 un iepriekšējās bremzēšanas režīma laikā pilnās rekuperētās enerģijas E_r dalījumu:

$$\eta_{uz/iz} = \frac{E_2}{E_r}. \quad (3.34.)$$

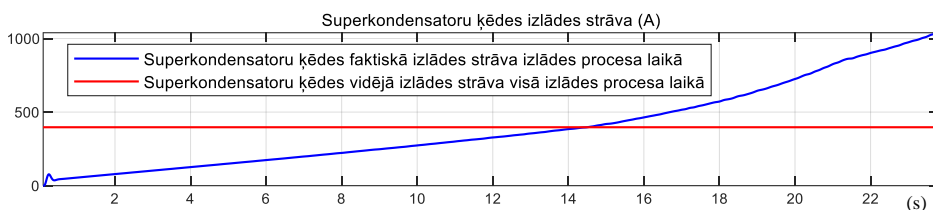
Pieņemot, ka trolejbuss paātrinājuma laikā patērē enerģiju E_d , tad attiecība starp E_2 un E_d atbilst intensitātei k , ar kādu SC EUS ir jāizlādē visu izlādes laiku t , lai nodrošinātu iepriekš minētos nosacījumus par EUS izlādi no V_1 līdz V_2 :

$$k = \frac{E_2}{E_d}. \quad (3.35.)$$

Pie EUS izlādes piedziņas pilnā jauda P_d sastāv no divām daļām – no apakšstacijas ņemtās jaudas P_1 un no EUS ņemtās jaudas P_2 . Var arī definēt, ka izlādes intensitāte k nosaka gan to, kādu daļu no pilnās piedziņas enerģijas E_d nodrošina no EUS ņemtā enerģija E_2 , gan to, kādu daļu reāllaikā no pilnās piedziņas jaudas P_d nodrošina no EUS ņemtā jauda P_2 . Tā kā k ir arī P_2 un P_d dalījums, tad P_2 atbilstošā izteiksme ir:

$$P_2 = kP_d. \quad (3.36.)$$

Iepriekšējā 3.13. attēlā $k \approx 0,376$, un tas nozīmē, ka visu trolejbuss ieskrējiena režīmu no EUS ņemtā jauda P_2 sastāda aptuveni 37,6 % no piedziņas pilnās jaudas P_d . Lai arī izlāde un uzlāde notiek vienādos sprieguma diapazonos, uzlāde notiek īsākā laikā, tāpēc uzlādes procesa vidējā strāva ir augstāka nekā izlādes procesa vidējā strāva, ja salīdzina 3.15. un 3.17. attēlus.

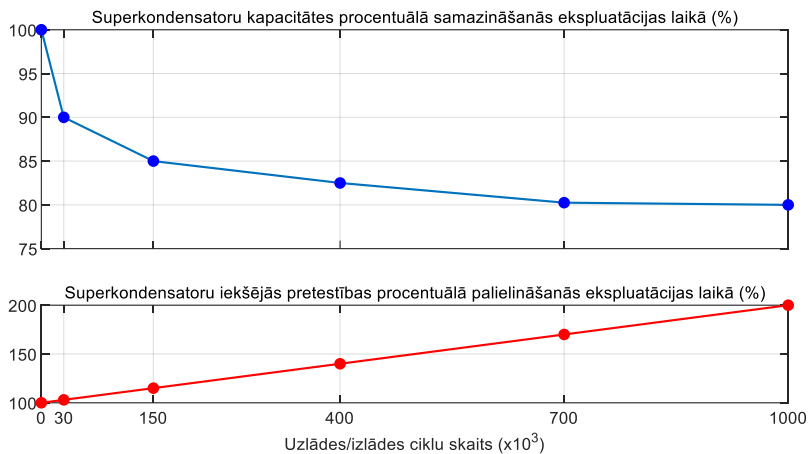


3.17. att. Superkondensatoru ķēdes strāva izlādes laikā.

3.4.3. Rekuperētās enerģijas izmantošanas efektivitātes atkarība no SC šūnu nolietojuma un no pielietoto iekārtu efektivitātes

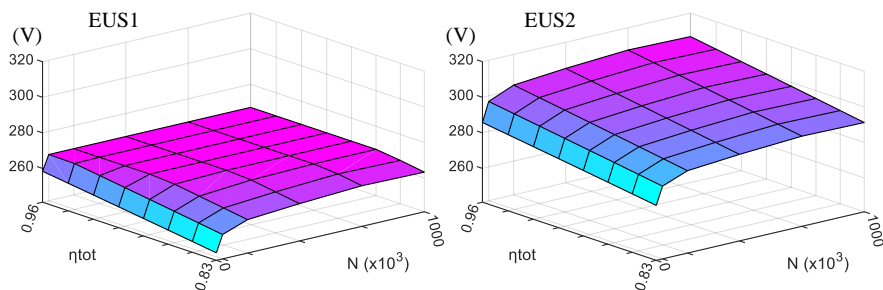
Turpmāk parādīti un salīdzināti dažādu parametru aprēķināšanas rezultāti 3D virsmu veidā atkarībā no virsrakstā minēto pielietoto iekārtu - invertora un impulsu pārveidotāja - kopējās efektivitātes η_{tot} un no SC nolietojuma jeb iepriekš notikušo uzlādes/izlādes ciklu skaita N , kas pieder intervālā $[0; 10^6]$. No iepriekš 3.11. attēlā redzamās ražotāja eksperimentālās līknes 2,7 V gadījuma, sešās vietās tika nolasītas aptuvenas kapacitātes C izmaiņas procentuālās vērtības un izveidota jauna līkne, kas redzama 3.18. attēlā. Atsevišķie aprēķini tiks veikti minētajos sešos punktos, t.i. – pie 0 ; $30 \cdot 10^3$; $150 \cdot 10^3$; $400 \cdot 10^3$; $700 \cdot 10^3$ un $1000 \cdot 10^3$ izlādes/uzlādes cikla. Netieši tiks pieņemts, ka minēto punktu starposmos jeb piecos posmos 3.18. attēlā kapacitāte

C samazinās lineāri. 3.18. attēla apakšējā daļā parādīta arī SC iekšējās pretestības R izmaiņas līkne. Līdzšinējie pieņēmumi un pētījumi apgalvo, ka R izmaiņām atšķirībā no kapacitātes C izmaiņām ir lineārāks raksturs [48]. Tika pieņemts, ka viena miljona cikla laikā R palielinās par 100 % neatkarīgi no cikla dziļuma, un līdz ar to R izmaiņa jebkurā darbmuža posmā ir viegli nosakāma ar taisnleņķa trijstūra likumsakarību palīdzību.



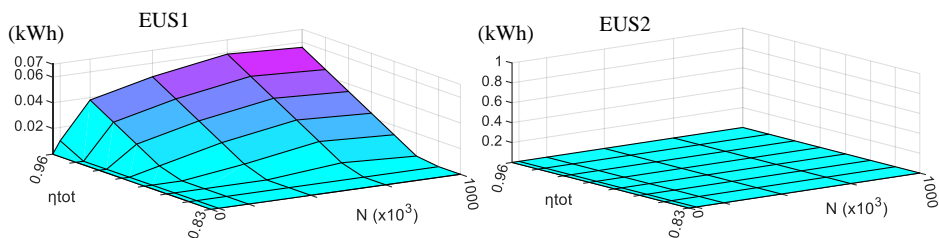
3.18. att. Superkondensatoru parametru pasliktināšanās diagrammas darbmuža laikā.

Pieņemot, ka atsevišķi gan invertoram, gan impulsu pārveidotājam minimālā efektivitāte var būt 91 %, bet maksimālā – 98 %, var attēlot uzlādes/izlādes procesa pilnās efektivitātes virsmas atkarībā no η_{tot} , kas atbilstoši iepriekš skaidrotajam η_{inv} un η_{imp} reizinājumam pieder intervālam [0,8281; 0,9604]. Turpmākos attēlos kreisajās pusēs parādīti EUS1 gadījumi, labajās pusēs – EUS2 gadījumi, lai uzskatāmi salīdzinātu abus EUS variantus. 3.19. attēlā redzamas virsmas SC ķēdes sprieguma V_c vērtībām uzlādes režīma beigās atkarībā no η_{tot} un N . Kapacitātes C samazināšanās ietekme visbūtiskāk izpaužas pēc 30 līdz 150 tūkstošiem uzlādes/izlādes ciklu, jo šajos intervālos V_c pieaug visstraujāk. EUS1 gadījumā virsmas plakanā daļa nozīmē to, ka tur maksimālais spriegums $V_{cmax} = 267$ V ticis sasniegts jau pirms piedziņas bremzēšanas režīma beigām. Savukārt EUS2 gadījumā maksimālais spriegums $V_{cmax} = 312$ V sasniegts netiek, lai arī pie augstākiem η_{tot} un N tiek gandrīz sasniegts.



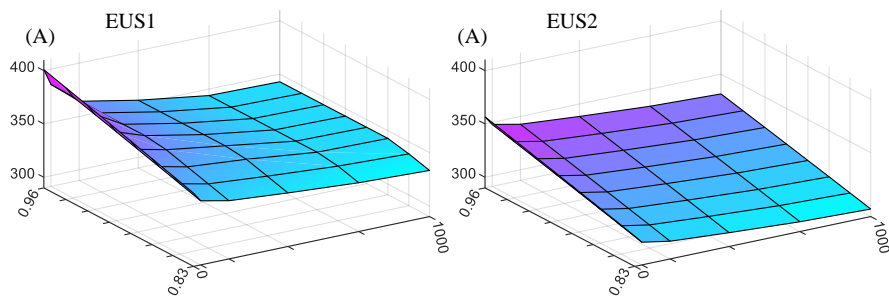
3.19. att. SC sprieguma V_c vērtības uzlādes procesa beigās.

Pēc 3.20. attēlā parādītās EUS1 gadījuma bremžu rezistoros izkliedētās enerģijas E_{IR} virsmas var secināt, ka jo E_{IR} ir lielāka, jo ātrāk pirms uzlādes laika beigām ticis sasniegts SC slēguma maksimālais spriegums V_{cmax} . Jebkurā 3.20. attēla virsmas vietā, kur E_{IR} ir lielāka par nulli, V_c ir sasniedzis maksimālo vērtību. EUS2 gadījumā bremžu rezistoros neizkliedējas nekāds enerģijas apjoms visā ekspluatācijas laikā, un tieši tas arī ir galvenais EUS2 plānošanas mērķis, kas tika sasniegts, aprēķinot nepieciešamo sākotnējo energoietilpību.



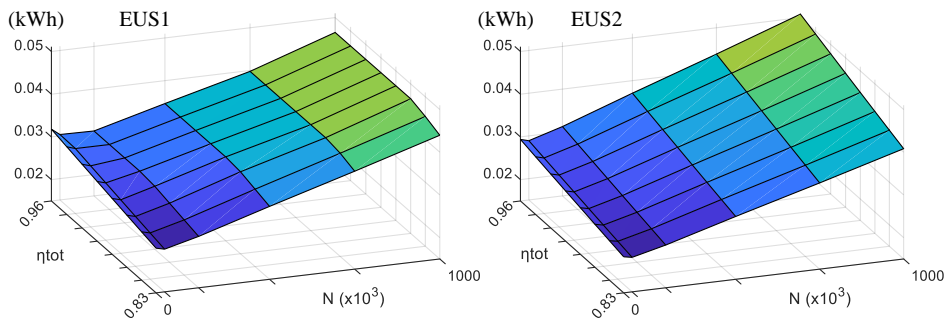
3.20. att. Rekuperētās enerģijas daļa, kas izkliedēta bremzēšanas rezistoros.

3.21. attēlā redzams, ka EUS izmantošanas sākumā, kad SC kapacitāte C ir visaugstākā, vidējā izlādes strāva, kas aprēķināta ar 3.16. formulu, ir augstāka, bet laika gaitā tā samazinās.



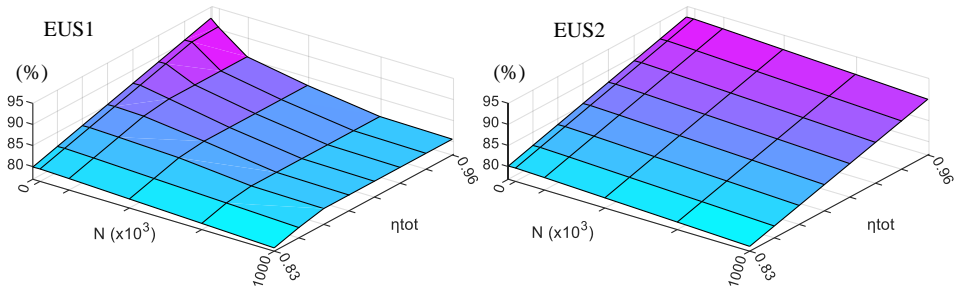
3.21. att. Vidējās izlādes strāvas virsmas.

3.22. attēlā redzamās enerģijas atbilst R dēļ zaudēto enerģiju summām no uzlādes un izlādes režīmiem. Redzama tāda īpatnība, ka SC ekspluatācijas sākumā ($N=0$) E_R ir nedaudz augstāka nekā pēc 30 tūkstošiem ciklu.



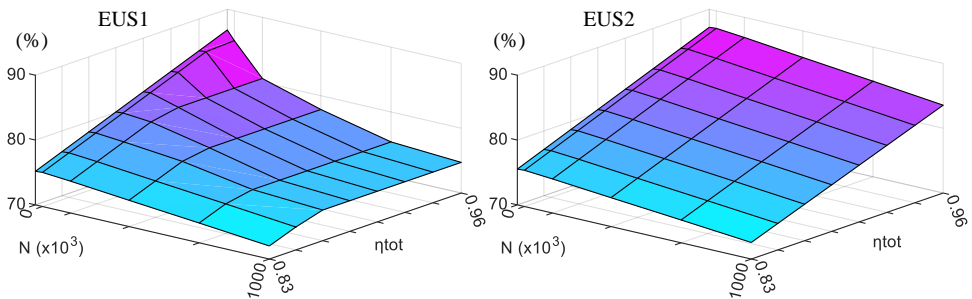
3.22. att. SC iekšējās pretestības dēļ zaudētā enerģija uzlādes/izlādes procesā.

3.23. attēlā redzamas uzlādes efektivitātes virsmas, kas aprēķinātas ar 3.18. formulu.



3.23. att. Rekuperētās enerģijas uzkrāšanas efektivitātes virsmas.

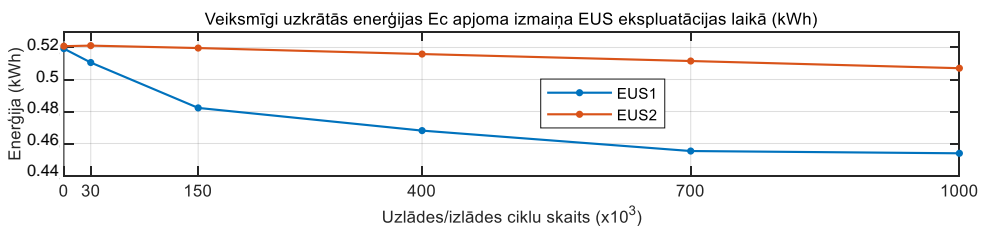
3.24. attēlā kā procenti no pilnās rekuperētās enerģijas attēlotas visa uzlādes/izlādes procesa efektivitātes virsmas, kas aprēķinātas ar 3.34. formulu. Uzlādes/izlādes efektivitātes EUS1 gadījumā ir pazeminātas apgabalos, kuros daļa enerģijas tiek izkliedēta bremžu rezistoros.



3.24. att. Rekuperētās enerģijas utilizēšanas (uzkrāšanas/izmantošanas) efektivitāšu virsmas.

No 3.19. – 3.24. attēlu virsmām var secināt, ka invertora un impulsu pārveidotāja efektivitātes atstāj manāmu ietekmi uz rekuperētās enerģijas uzkrāšanu un izmantošanu, tāpēc ieteicams izvēlēties iekārtas ar pēc iespējas augstākām efektivitātēm. Līdz ar to turpmākos aprēķinos tiks pieņemts, ka $\eta_{inv} = 98\%$ un $\eta_{imp} = 98\%$, rezultējoties ar $\eta_{tot} = 96,04\%$.

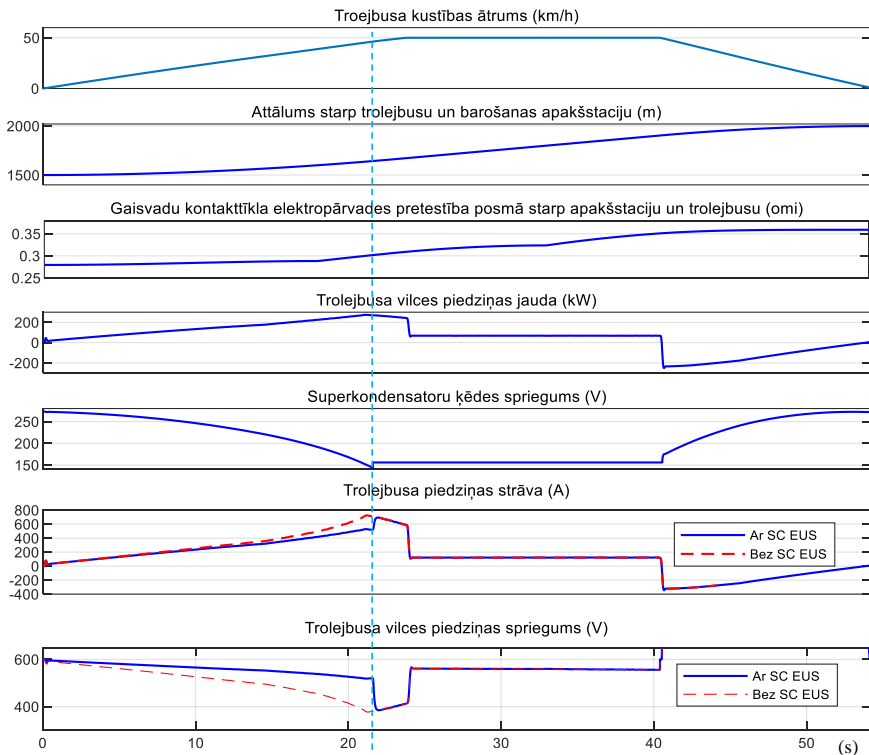
3.25. attēlā parādītas veiksmīgi uzkrātās enerģijas E_c , vadoties pēc 3.14. attēla, EUS1 un EUS2 visā to ekspluatācijas laikā. EUS2 ekspluatācijas laikā tiek veiksmīgi uzkrāts vairāk enerģijas ar aptuveni 9,8% starpību, ja salīdzina attiecīgo trapeču laukumus, ko norobežo EUS1 un EUS2 E_c līknes, x ass un y ass līdz nullei (mazākā parādītā vērtība ir 0,44 kWh).



3.25. att. Veiksmīgi uzkrātās rekuperētās enerģijas izmaiņas līknes SC ekspluatācijas laikā.

3.5. Mobilas superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas optimālas izlādes vadības stratēģijas un to efektivitāšu salīdzinājums

Šinī apakšnodaļā veiktos aprēķinus un simulācijas tika nolemts veikt 27Tr trolejbusam, kas ir līdz pusei piepildīts ar pasažieriem un aprīkots ar SC EUS2, uz kuru turpmāk atsauksimies kā EUS. Ar maksimālo pasažieru skaitu (154 pers.) 27Tr piepildīts ir ļoti reti. Tāpēc var pieņemt, ka vidēji 27Tr ir līdz pusei piepildīts ar pasažieriem (77 pers.), un šādā gadījumā 42 pasažieri sēž, 35 – stāv kājās. Saskaņā aprēķiniem un simulācijām pēc iepriekš aprakstītajām metodēm pustukšs Škoda 27Tr, bremszēdams no 50 km/h sākotnējā ātruma, rekuperē aptuveni 0,493 kWh enerģijas, no kurām aptuveni 0,458 kWh enerģijas tiek veiksmīgi uzkrāts SC EUS, kas uzlādējas no sākotnējā minimālā 156 V sprieguma līdz 273 V. Turpmāk par piemēru tiks aplūkots gadījums, kur trolejbuss atrodas 1500 m attālumā no apakšstacijas un paātrinās līdz 50 km/h 23,8 sekunžu laikā, attālinādamies no apakšstacijas. Vispirms aplūkosim situāciju, kur SC EUS nodrošina 50 % no piedziņai nepieciešamās jaudas jau kopš kustības uzsākšanas. 3.26. attēla redzami simulācijas rezultāti trolejbusa kustībai, kas iekļauj paātrināšanās, vienmērīgas kustības un bremsēšanas režīmus. Var redzēt, ka EUS izlādējas līdz minimāli pieļaujamajam 156 V spriegumam aptuveni 2 sekundes pirms paātrināšanās režīma beigām. Līdz ar to rodas apakšstacijas jaudas pīķis, jo pēc EUS izlādes visu nepieciešamo jaudu nākas ņemt no tīkla.



3.26. att. Trolejbusa kustības un SC izlādes/uzlādes simulācijas rezultātu līknes.

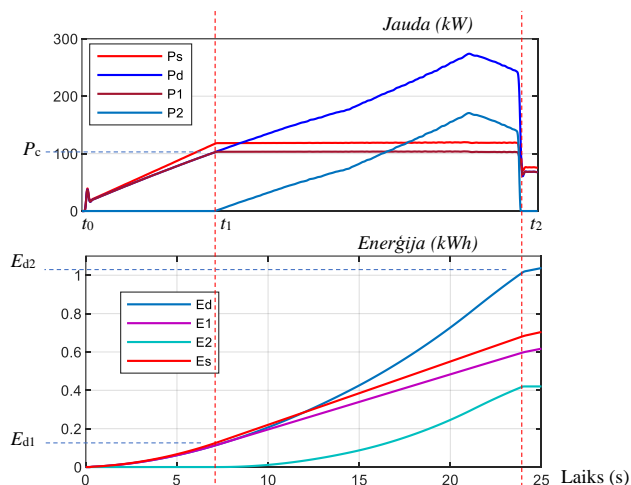
3.26. attēlā var redzēt, ka EUS izlādēšanās brīdī strauji samazinās piedziņas spriegums sakarā ar gaisvadu līnijas sprieguma krituma palielināšanos, ko izraisa no apakšstacijas ņemtās strāvas palielināšanās. Sprieguma krituma palielināšanās dēļ palielinās piedziņas strāva, tādējādi nodrošinot piedziņai nepieciešamo jaudu.

Ņemot vērā to, ka trolejbusa paātrināšanās režīma beigu posmā piedziņa patērē visaugstāko jaudu, var secināt, ka visefektīvākās varētu būt tādas EUS izlādes stratēģijas, kuru ietvaros SC EUS tieši paātrināšanās režīma beigu posmā aktīvāk iesaistās piedziņas jaudas apgādē. Tas pamatojams ar to, ka pie augstākām no tikla ņemtām jaudām elektropārvades zudumi attiecīgi ir augstāki nekā, piemēram, pie zemākām jaudām kustības uzsākšanas sākumā. Ja SC EUS spēj piedalīties jaudas nodrošināšanā paātrināšanās režīma beigās, tad apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa ietaupījumi ir augstāki, jo šos ietaupījumus sastāda ne tikai piedziņas pilnās jaudas daļa, ko nodrošina SC EUS, bet arī novērstie elektropārvades zudumi, kādi būtu bijuši bez EUS iesaistes.

Turpmāk tiks aprakstītas trīs dažādas SC EUS izlādes stratēģijas un pēc tam salīdzinātas efektivitātes ziņā, vadoties pēc elektropārvades zudumu un apakšstacijas pilnās enerģijas patēriņa samazinājuma, salīdzinot ar situāciju bez SC EUS.

3.5.1. Stratēģija ar apakšstacijas jaudas pīķa ierobežošanu

Stratēģijas ideja izskaidrota ar 3.27. attēla simulācijas rezultātu palīdzību, kur attēlota pilnā piedziņas jauda P_d , pilnā apakšstacijas jauda P_s , no apakšstacijas nodrošinātā piedziņas jaudas daļa P_1 un no SC EUS nodrošinātā piedziņas jaudas daļa P_2 . Turklāt jauda P_d ir vienāda ar P_1 un P_2 summu. No trolejbusa kustības uzsākšanas sākuma momenta t_0 līdz laikam t_1 piedziņai nepieciešamo jaudu nodrošina tika apakšstacija.



3.27. att. Simulācijas rezultāti SC izlādes stratēģijai ar apakšstacijas jaudas pīķa ierobežošanu.

Laika momentā t_1 , kad piedziņas jauda sasniedz noteiktu 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 to pašu P_c . Intensitāte k , ar kādu SC EUS laikā no t_1 līdz t_2 tiek izlādēta, tiek aprēķināta kā:

$$k = \frac{p_d - P_c}{p_d}. \quad (3.37.)$$

Pamatmērķis ir SC EUS pieejamās enerģijas maksimāla izmantošana, un tas nozīmē, ka tieši ieskrējiena režīma beigu momentā t_2 EUS ir jābūt pilnībā izlādētai līdz minimāli pieļaujamam spriegumam. Līdz ar to uzdevums ir noskaidrot, kurā laika momentā t_1 un pie kādas P_c vērtības sasniegšanas jaudas apgādē iesaistīt EUS, un zemāk aprakstīti šī uzdevuma izpildes soļi.

- Iepriekš ir jāzina, kādu enerģiju E_{d2} trolejbusa piedziņa ir patērējusi, kad tā ir paātrinājusies no 0 km/h līdz 50 km/h un kad piedziņas jauda ir samazinājusies līdz gandrīz konstantai jaudai laika momentā t_2 . Tomēr jāņem vērā tas, ka saskaņā ar simulāciju rezultātiem paātrināšanās režīmam beidzoties, proti, 50 km/h ātruma sasniegšanas brīdī piedziņas jauda nesamazinās ar tūlītēju kritienu. Laiks, kurā piedziņas jauda pie 50 km/h ātruma sasniegšanas samazinās līdz jaudai, kāda nepieciešama 50 km/h konstanta ātruma uzturēšanai, ilgst apmēram 0,4 s saskaņā ar 3.27. attēlu. Tas nozīmē, ka, ja EUS pārtrauks piedziņu apgādāt ar jaudu tieši 50 km/h sasniegšanas brīdī, tad uz 0,4 s sekos ass apakšstacijas jaudas pīķis sakarā ar iepriekšējā teikumā minēto. Tāpēc turpmāk tiks izmantoti šādi ieskrējiena režīma parametri, proti $E_{d2} = 1,0213$ kWh un $t_2 = 24,2$ s.
- Lai noskaidrotu meklēto jaudu P_c un laiku t_1 , izmanto piedziņas jaudas līkni. Citiem vārdiem sakot, katru no piedziņas jaudas vērtībām p_d pieņem par P_c , iegūstot turpmāko aprēķinu rezultātu tabulu, piemēram, *MS Excel* vai citā programmā.
- Iepriekš ir jāzina arī piedziņas enerģija E_{d1} , kādu piedziņa ir patērējusi no laika momenta t_0 līdz aplūkojamās P_c vērtības sasniegšanai laika momentā t_1 . Tā kā laikā no t_1 līdz t_2 no apakšstacijas tiek nodrošināta konstanta jauda P_c , tad piedziņas pilnās enerģijas E_{d2} daļa E_1 , ko nodrošinās apakšstacija visā paātrināšanās laikā no t_0 līdz t_2 , ir aprēķināma pēc formulas:

$$E_1 = E_{d1} + P_c(t_2 - t_1). \quad (3.38.)$$

- Izmantojot 3.38. formulu, E_1 aprēķina pie visām p_d jeb p_c vērtībām. Piedziņas pilnās enerģijas E_{d2} daļa jeb enerģijas apjoms E_2 , ko EUS jāspēj nodrošināt laika periodā no t_1 līdz t_2 , ir aprēķināms pēc formulas:

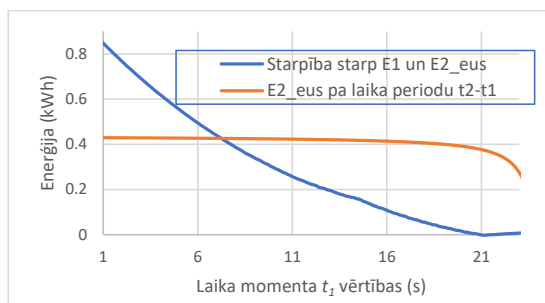
$$E_2 = E_{d2} - E_1. \quad (3.39.)$$

- Izmantojot 3.39. formulu, E_2 aprēķina visām P_c un tām attiecīgām E_1 vērtībām. Iepriekš ir jāzina SC EUS sākotnēji pieejamais enerģijas apjoms E_{eus} , lai varētu aprēķināt enerģijas apjomu $E_{2,eus}$, kurš veiksmīgi tiks līdz piedziņai, un šim aprēķinam izmanto iepriekšējā apakšnodaļā aprakstīto vidējās strāvas metodi. Ņemot vērā to, ka laika

periods, kurā piedziņas apgādē ar jaudu iesaistās arī EUS, ir vienāds ar $(t_2 - t_1)$, enerģiju E_{2_eus} var aprēķināt pēc formulas:

$$E_{2_eus} = \left(E_{eus} - \left(\frac{C(V_1 - V_2)}{(t_2 - t_1)} \right)^2 R(t_2 - t_1) \right) \eta_{tot}. \quad (3.40.)$$

- Tātad E_2 , kas aprēķināta pēc 3.38. formulas, ir enerģijas apjoms, kādu EUS ir jāspēj nodrošināt laikā no t_1 līdz t_2 , bet E_{2_eus} , kas aprēķināta pēc 3.39. formulas, ir enerģijas apjoms, kādu EUS faktiski spēj nodrošināt laikā no t_1 līdz t_2 . Tas nozīmē, ka konkrētajā situācijā iepriekš aprēķinu rezultātu tabulā ir jāatrod tas variants, kur enerģiju E_2 un E_{2_eus} skaitliskās vērtības ir vai nu vienādas, vai arī ar vismazāko atšķirību, jo pilnīgi vienādu skaitlisko vērtību var arī nebūt. Lai šo meklēšanu atvieglotu, vispirms E_2 un E_{2_eus} var attēlot vienā plaknē līkņu veidā kā funkciju no laika $(t_2 - t_1)$, kā redzams 3.28. attēlā. Punktā, kur abas līknes krustojās, var nolasīt gan attiecīgo E_{2_eus} vērtību, gan arī laika perioda $(t_2 - t_1)$ vērtību. Pēc tam skaitlisko rezultātu tabulās atrod arī noskaidrotajām E_{2_eus} un $(t_2 - t_1)$ vērtībām atbilstošo P_c .



3.28. att. Līknes E_2 un E_{2_eus} atkarībā no t_1 .

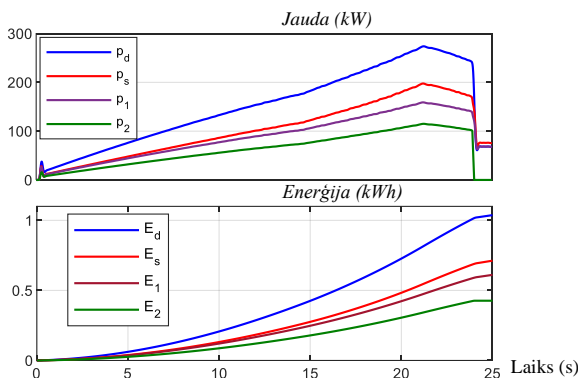
Jāatzīmē, ka augstāk aprakstītie aprēķini attiecas uz idealizētu gadījumu, kad visu paātrinājuma laiku EUS izlādējas līdz minimumam, taču ja kaut kādu iemeslu dēļ EUS izlādēsies pirms paātrināšanās režīma beigām jeb 50 km/h ātruma sasniegšanas, tā visa nepieciešamā jauda nekavējoties tiks ņemta no apakšstacijas, izraisot strauju apakšstacijas jaudas pīķi. Tāpēc reālā situācijā tomēr ieteicams izvēlēties tādu P_c , kas ir nedaudz augstāka nekā ar 3.40. formulu aprēķinātajai E_{2_eus} atbilstošā P_c , jo šādā veidā tiek samazināta iespēja, ka EUS varētu izlādēties pirms paātrinājuma režīma beigām.

3.5.2. Stratēģija ar konstantu izlādes proporcionalitāti

Stratēģijas ideja ir izskaidrota ar 3.29. attēlā parādīto simulācijas rezultātu palīdzību. No trolejbusa kustības uzsākšanas sākuma momenta t_0 līdz laikam t piedziņai nepieciešamo jaudu nodrošina gan apakšstacija, gan EUS ar nemainīgu sadalījumu. Izlādes intensitāte jeb proporcionalitāte atbilst koeficientam k , kas nosaka, kādu daļu no pilnās piedziņas jaudas p_d

sastāda no SC EUS nodrošinātā jauda p_2 visā trolejbusa paātrinājuma laikā t no 0 km/h līdz 50 km/h. Savukārt k visā izlādes laikā ir nemainīgs. Zinot, ka EUS izlādes laikā t izlādēsies no V_1 līdz V_2 , izmantojot iepriekšējā apakšnodaļā aprakstīto vidējās strāvas metodi, var aprēķināt enerģijas apjomu E_{2_eus} , kurš izlādes laikā t veiksmīgi sasniegs piedziņu:

$$E_{2_eus} = \left(E_{eus} - \left(\frac{C(V_1 - V_2)}{t} \right)^2 Rt \right) \eta_{tot} \quad (3.41.)$$



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

Iepriekš ir jāzina, kādu enerģiju E_d trolejbusa piedziņa patērē laikā t , paātrinoties no 0 km/h līdz 50 km/h. Izlādes intensitāti jeb k var aprēķināt gan kā E_{2_eus} un E_d dalījumu, gan kā reāllaika p_2 un p_d dalījumu:

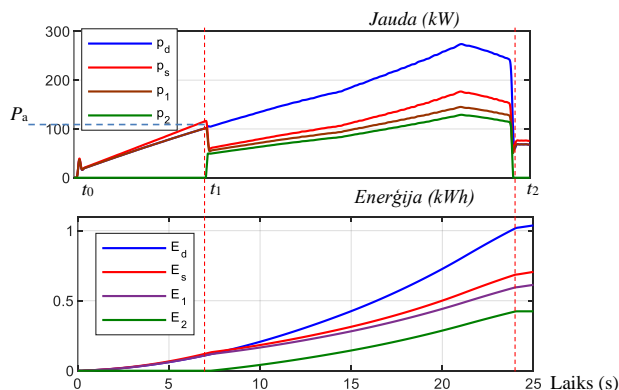
$$k = \frac{E_{2_eus}}{E_d} = \frac{p_2}{p_d} \quad (3.42.)$$

Līdz ar to izlādes laikā pie zināmas piedziņas jaudas p_d no EUS ņemtās jaudas apjoms tiek regulēts saskaņā ar iepriekš minēto 3.36. formulu.

3.5.3. Stratēģija ar konstantu izlādes proporcionalitāti un vēlāku izlādi

No trolejbusa kustības uzsākšanas sākuma momenta t_0 līdz laikam t_1 piedziņai nepieciešamo jaudu nodrošina tikai apakšstacija, kā redzams 3.30. attēlā. Laika momentā t_1 , kad piedziņa sasniedz noteiktu vērtību P_a , piedziņas jaudas apgādē sāk iesaistīties arī SC EUS tādā veidā, ka visu turpmāko laiku no t_1 līdz t_2 piedziņu ar jaudu apgādā gan apakšstacija, gan EUS ar nemainīgu sadalījumu, proti, EUS izlādes intensitāte jeb proporcionalitāte k , kas aprēķināta ar 3.42. formulu, saglabājas nemainīga, savukārt izlādes režīma beigās EUS ir izlādējusies līdz minimāli pieļaujamajam sprieguma līmenim. Šo stratēģiju var uzskatīt kā papildinājumu iepriekšējai stratēģijai, kur aprakstītā EUS izlādes intensitāte k ir maksimāli iespējamā, ja EUS piedalās piedziņas jaudas apgādē visu paātrinājuma laiku. Savukārt šīs stratēģijas ietvaros pie vēlākas EUS iesaistes izlādes koeficients k jebkurā gadījumā būs augstāks salīdzinājumā ar

iepriekšējo stratēģiju. No tā izriet, ka jo izlādes uzsākšana būs vēlāka, jo augstāks būs attiecīgais izlādes intensitātes koeficients k .



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

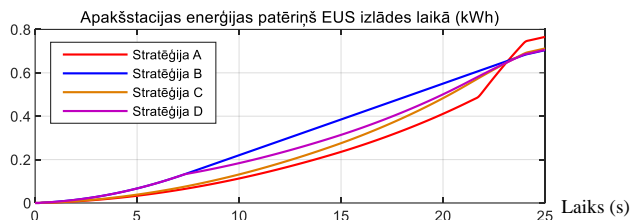
Šādā situācijā iepriekš jāizvēlas laika moments t_1 , kad jaudas apgādē iesaistīsies EUS, un jānolasa šim momentam atbilstošā piedziņas patērētā enerģija E_{d1} . Enerģijas apjomu E_{2_eus} , kurš veiksmīgi tiks līdz piedziņai, aprēķina pēc tādas pašas kā 3.41. formulas. Kā par piemēru izvēlēts $t_1 = 7,26$ s, kas atbilda laika t_1 vērtībai no iepriekšējās apakšstacijas jaudas pīķa ierobežošanas stratēģijas. Konstanto izlādes intensitātes koeficientu k , kāds būs spēkā no laika t_1 līdz t_2 , aprēķina pēc formulas:

$$k = \frac{E_{2_eus}}{E_d - E_{d1}} = \frac{p_2}{p_d}. \quad (3.43.)$$

3.5.4. Stratēģiju efektivitāšu salīdzinājums

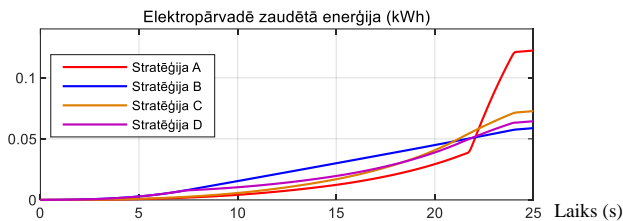
Turpmāk uz 3.26. attēlā redzamo EUS izlādes gadījumu ar 50 % intensitāti, kur EUS izlādējās pirms paātrināšanās režīma beigām, atsauksimies kā uz A stratēģija, uz 3.27. attēlā redzamo apakšstacijas jaudas ierobežošanas stratēģiju – B stratēģija, uz 3.29. attēlā redzamo gadījumu ar konstantu izlādes intensitāti – C stratēģija, uz 3.30. attēlā redzamo gadījumu ar konstantu izlādes intensitāti pie vēlākas izlādes uzsākšanas – D stratēģija.

3.31. attēlā redzams, ka A stratēģijas gadījumā, sākot ar brīdi, kad EUS izlādējās pirms paātrināšanās režīma beigām, apakšstacijas enerģijas patēriņš strauji pieaug. Rezultātā šī stratēģija, kurai salīdzinājumā ar pārējām trijām paātrināšanās režīma beigās ir augstāks apakšstacijas enerģijas patēriņš, ir visneefektīvākā. Savukārt pārējās stratēģijas (B, C un D), kuru ietvaros paātrināšanās režīma beigās EUS piedalās jaudas apgādē, izskatās līdzvērtīgas, ja skatās uz apakšstacijas enerģijas patēriņa līknēm, kuras paātrinājuma režīma beigās ir gandrīz pārklājušās.



3.31. att. Apakšstacijas patērētās enerģijas līknes katrai no aplūkotajām SC izlādes stratēģijām.

3.32. attēlā redzamās elektropārvadē zaudētās enerģijas līknes ļauj precīzāk salīdzināt B, C un D stratēģijas. Var redzēt, ka tīri skaitliski visefektīvākā ir apakšstacijas jaudas ierobežošanas stratēģija (B). Kopumā var apstiprināt sākotnēji izvirzīto hipotēzi, ka ESS vajadzētu iesaistīt piedziņas jaudas apgādē paātrināšanās režīma beigu posmā, jo šādā veidā tiek samazināts elektropārvades zudumu apjoms un līdz ar to arī kopējais apakšstacijas enerģijas patēriņš. Paātrināšanās režīma beigās stratēģijām B, C un D pārvades zudumu apjoms ir aptuveni divas reizes mazāks nekā stratēģijas A gadījumā. Elektropārvades zudumu samazināšanas ziņā stratēģija B ir par aptuveni 52 % efektīvāka par stratēģiju A. Taču vadoties pēc apakšstacijas pilnā skaitliskā enerģijas patēriņa 3.31. att, no kura pārvadē zaudētā enerģija veido vien nelielu daļu, stratēģija B ir par 8 % efektīvāka par stratēģiju A. Savukārt stratēģijas C un D ir tikai par aptuveni 1 % neefektīvākas salīdzinājumā ar stratēģiju B.



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

3.6. Transporta mobilās superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas masas ietekme uz kopējo elektroenerģijas patēriņu

Līdzās mobilas EUS sniegtajai iespējai uzkrāt un otrreizēji izmantot rekuperēto enerģiju nedrīkst aizmirst arī to, ka trolejbusa aprīkošana ar mobilu EUS papildus nozīmē arī trolejbusa pilnās masas palielināšanos. Līdz ar to mobilas EUS dēļ trolejbuss ir noslogotāks un trolejbusa piedziņa ir spiesta patērēt vairāk enerģijas gan paātrināšanās, gan vienmērīgas kustības laikā.

Taču līdz šim nav ticis pētīts, cik lielā mērā palielinās elektriskā transporta enerģijas patēriņš papildus mobilas EUS masas dēļ, un vai šis pieaugums būtu uzskatāms par būtisku uz visas atgūstamās un otrreizēji izmantojamās reģenerētās enerģijas fona. Tāpēc tika nolemts ar simulāciju palīdzību izpētīt mobilas EUS masas ietekmi ne vien uz trolejbusa piedziņas patēriņu trolejbusa paātrināšanās laikā, bet arī uz apakšstacijas pilnās enerģijas patēriņu gadījumā, ja uzstādītā EUS nepiedalās piedziņas apgādē ar enerģiju. Tika aplūkots trolejbusa 27Tr gadījums ar iepriekš aprēķināto mobilo EUS2, kuras masa ir 459 kg. 3.4.tabulā parādīts trolejbusa bez mobilas EUS un trolejbusa ar mobilu EUS pilno masu procentuāls salīdzinājums tukša, līdz

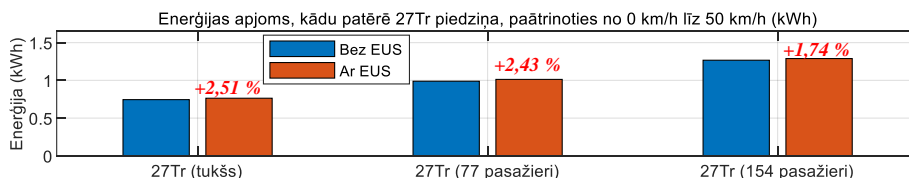
pusei ar pasažieriem piepildīta un pilnībā ar pasažieriem piepildīta trolejbusa gadījumā. Var redzēt, ka EUS vislielāko ietekmi uz trolejbusa pilno masu atstāj tukša trolejbusa gadījumā, jo tās pašas EUS masa sastāda lielāku daļu no trolejbusa pilnās masas salīdzinājumā ar līdz pusei piepildītu un pilnībā ar pasažieriem piepildītu trolejbusu.

3.4. tabula

Trolejbusa masas

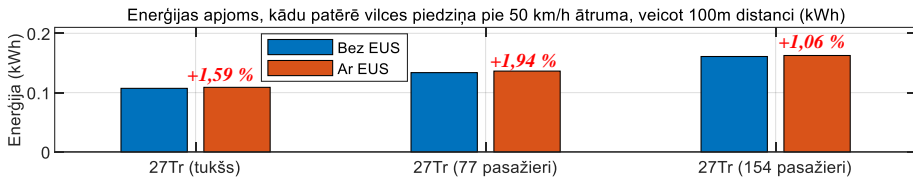
	27Tr
Tukša trolejbusa masa	19 000 kg
Tukša trolejbusa masa + EUS masa	19 459 kg (+2,4%)
Trolejbusa, kurā ir aizpildīti 50 % pasažieru vietu, masa (77 pasažieri)	24 775 kg
Trolejbusa, kurā ir aizpildīti 50 % pasažieru vietu, masa + EUS masa	25 234 kg (+1,9%)
Trolejbusa, kurā ir aizpildīti 100 % pasažieru vietu, masa (154 pasažieri)	30 550 kg
Trolejbusa, kurā ir aizpildīti 100 % pasažieru vietu, masa + EUS masa	31 009 kg (+1,5%)

Vispirms tika nolemts pārbaudīt, par cik procentiem trolejbusa vilces piedziņa patērē vairāk enerģijas, paātrinoties no 0 km/h līdz 50 km/h, ja trolejbuss ir aprīkots ar mobilu EUS, salīdzinājumā ar identisku kustības ciklu, ja trolejbuss nav aprīkots ar mobilu EUS. Papildus tika nolemts pārbaudīt, par cik procentiem trolejbusa vilces piedziņa patērē vairāk enerģijas, veicot 100m vienmērīgas kustības ciklu ar 50 km/h ātrumu, ja trolejbuss ir aprīkots ar mobilu EUS, salīdzinājumā ar identisku kustības ciklu, kad trolejbuss nav aprīkots ar mobilu EUS. Tika pārbaudīts arī par cik procentiem trolejbuss, kas aprīkots ar EUS, rekupeerē vairāk enerģijas, būdams smagāks salīdzinājumā ar trolejbusu bez EUS. Tika veiktas tukša, līdz pusei ar pasažieriem piepildīta un pilnībā ar pasažieriem piepildīta trolejbusa 27Tr kustības simulācijas, kur trolejbuss 50 km/h kustības ātrumu sasniedz aptuveni 24 s laikā. Sākotnēji pieņemtais attālums starp apakšstaciju un trolejbusu bija 1,5 km, bet kustības laikā trolejbuss no apakšstacijas attālinājās. Tāpēc tika salīdzināti arī elektropārvades zudumu apjomi un pilnie apakšstacijas enerģijas patēriņi gan paātrinoties līdz 50 km/h, gan veicot 100 m distanci ar 50 km/h ātrumu situācijām ar un bez EUS. 3.33. attēlā var redzēt, ka visaugstākais piedziņas enerģijas patēriņa procentuālais pieaugums, paātrinoties līdz 50 km/h ir tukšam 27Tr ar aptuveni 2,5 %, salīdzinot situācijas ar un bez EUS, bet noslogotiem 27Tr procentuālie pieaugumi vienmērīgi samazinās jeb dilst, ja salīdzina atšķirības secīgām trolejbusa masām.



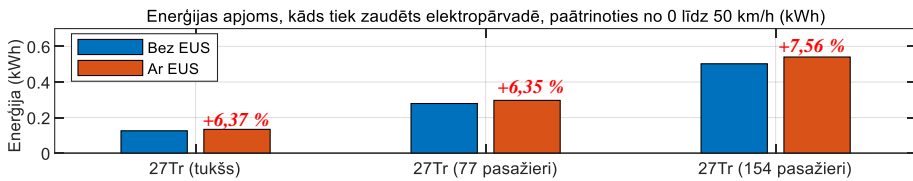
3.33. att. Enerģijas patēriņu salīdzinājumi paātrinājumiem līdz 50 km/h.

3.34. attēlā redzams, ka veicot 100 m distanci ar 50 km/h ātrumu, piedziņas enerģijas procentuālie pieaugumi dažādām secīgām trolejbusu masām gadījumos ar un bez EUS nav vienmērīgi pieaugoši vai dilstoši, ja salīdzina ar 3.33. attēlu, bet ir robežās no 1 % līdz 2 %.



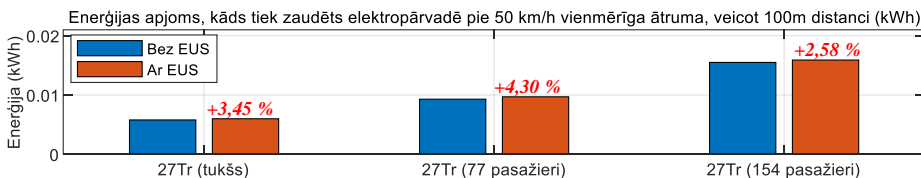
3.34. att. Enerģijas patēriņu salīdzinājumi pie vienmērīgas 50 km/h kustības.

3.35. attēlā redzams, ka paātrinoties līdz 50 km/h, elektropārvadē zaudētās enerģijas apjoma procentuālie pieaugumi dažādām secīgām trolejbusu masām gadījumos ar un bez EUS nav vienmērīgi pieaugoši vai dilstoši, bet ir robežās no aptuveni 6,3 % līdz 7,6 %.



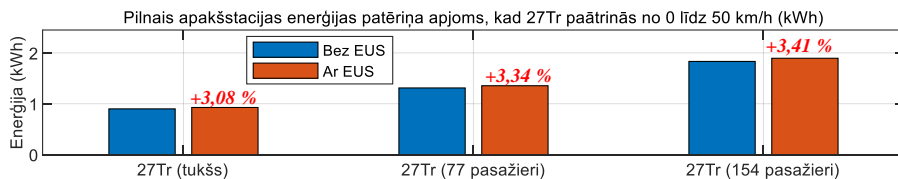
3.35. att. Elektropārvadē zaudēto enerģiju salīdzinājumi pie paātrināšanās līdz 50 km/h.

3.36. attēlā redzams, ka veicot 100 m distanci ar 50 km/h ātrumu, elektropārvadē zaudētās enerģijas apjoma procentuālie pieaugumi dažādām secīgām trolejbusa masām gadījumos ar un bez EUS nav vienmērīgi pieaugoši vai dilstoši, bet ir robežās no 2,5 % līdz 4,3 %.



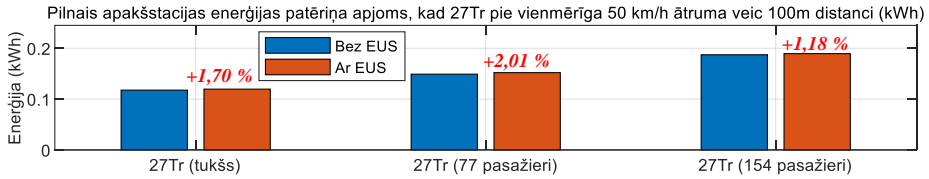
3.36. att. Elektropārvadē zaudēto enerģiju salīdzinājumi pie vienmērīgas 50 km/h kustības.

3.37. attēlā redzams, ka paātrinoties līdz 50 km/h, apakšstacijas pilnās enerģijas patēriņš dažādām secīgām trolejbusu masām gadījumos ar un bez EUS ir vienmērīgi pieaugošs robežās nedaudz virs 3 %.



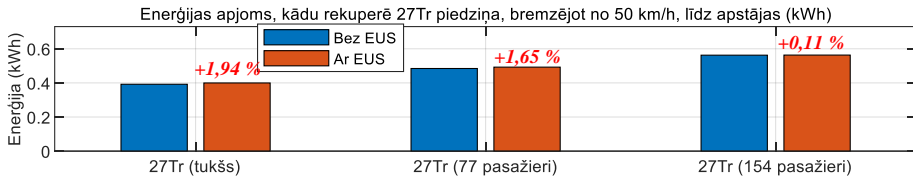
3.37. att. Apakšstacijas enerģijas patēriņa salīdzinājumi pie paātrinājuma līdz 50 km/h.

3.38. attēlā redzams, ka veicot 100 m distanci ar 50 km/h ātrumu, apakšstacijas pilnās enerģijas patēriņš dažādām trolejbusa masām gadījumos ar un bez EUS nav vienmērīgi pieaugošs vai dilstošs, bet ir robežās no aptuveni 1,2 % līdz 2 %.



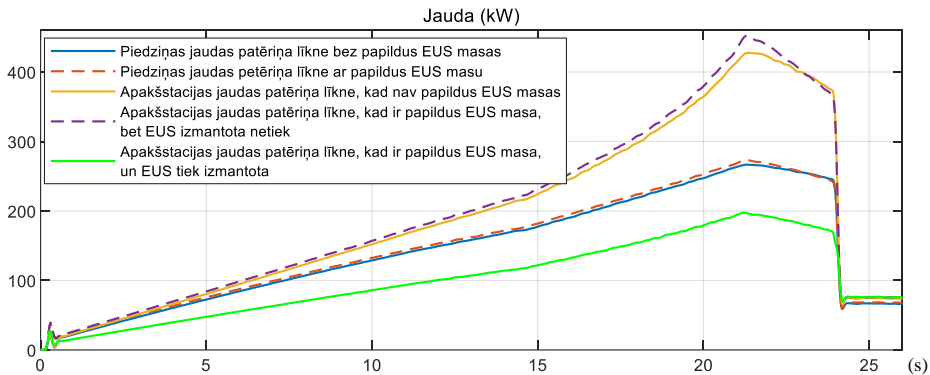
3.38. att. Apakšstacijas enerģijas patēriņa salīdzinājumi pie vienmērīgas 50 km/h kustības.

3.39. attēlā redzams, ka visaugstākais rekuperētās enerģijas apjoma procentuālais pieaugums ir tukšam 27Tr ar 1,9 %, savukārt papildītiem trolejbusiem pie secīgām masām šīs atšķirības ir dilstošas.



3.39. att. Rekuperētās enerģijas salīdzinājumi pie bremzēšanas no 50 km/h sākotnējā ātruma.

Papildus EUS masas dēļ visvairāk palielinās elektropārvadē zaudētās enerģijas apjoms paātrinoties līdz 50 km/h saskaņā ar 3.35. attēlu, kur visos gadījumos pieaugums ir virs 5 %. Taču tā kā pārvadē zaudētā enerģija sastāda nelielu daļu no pilnā apakšstacijas enerģijas patēriņa apjoma, tad saskaņā ar 3.38. attēlu pilnais apakšstacijas enerģijas patēriņš papildus EUS masas dēļ palielinās robežās zem 3,5 %. Turklāt šī atšķirība ir aktuāla tikai tādā gadījumā, ja EUS izmantota netiek, proti, vienkārši atrodas uz transportlīdzekļa borta. 3.40. attēlā uzskatāmi parādītas jaudu līknes līdz pusei piepildīta 27Tr gadījumā, kad tas sākumā atrodas 1,5 km attālumā no apakšstacijas un paātrinās līdz 50 km/h gadījumiem ar un bez EUS izmantošanas. Par piemēru parādīta apakšstacijas jaudas patēriņa līkne (zaļa), ja tiek izmantota izlādes stratēģija ar konstantu izlādes intensitāti.



3.40. att. Jaudu vērtību diagrammu salīdzinājums.

3.40. attēlā ir redzams, ka pateicoties EUS izmantošanai, apakšstacijas jaudas patēriņš ir ievērojami mazāks, savukārt laukums, kuru ierobežo apakšstacijas enerģijas patēriņš gadījumā bez EUS (dzeltenā līkne) un apakšstacijas jaudas patēriņš gadījumā ar EUS (zaļā līkne), uzskatāms par ietaupītās apakšstacijas enerģijas apjomu, kas konkrētajā gadījumā no kustības uzsākšanas brīža līdz paātrināšanās režīma beigām sastāda aptuveni 48 %. No tā var secināt, ka EUS izmantošanas gadījumā apakšstacijas enerģijas patēriņa ietaupījums būtiski atsver mobilas EUS galveno trūkumu - transportlīdzekļa pilnās masas pieaugumu. Gadījumā bez EUS izmantošanas apakšstacijas jaudas patēriņa līkne paātrināšanās režīma beigās ir ievērojami augstāka par jaudas patēriņa līkni, sasniedzot pat 40 % atšķirību pie dotā 1,5 km sākotnējā attāluma starp trolejbusu un apakšstaciju, jo vērts atgādināt, ka apakšstacijas jaudas patēriņš ietver ne tikai elektropārvadē zaudēto jaudu, bet arī apakšstacijas invertorā, taisngriezī un piedziņas invertorā zaudētās jaudas.

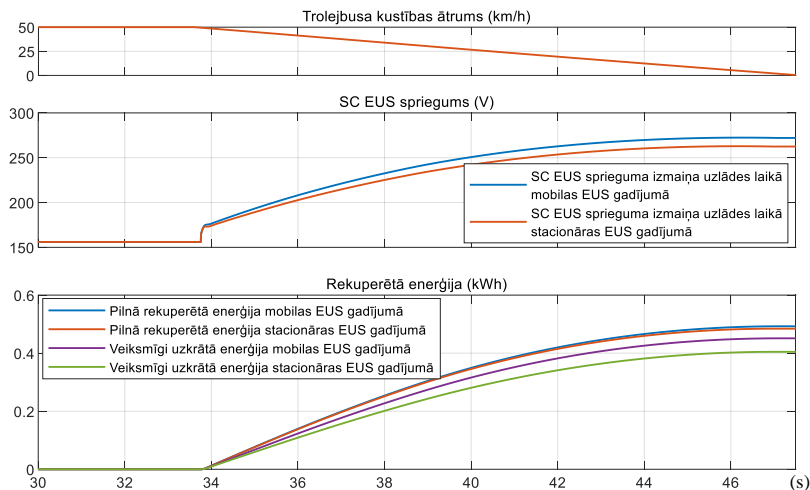
3.7. Mobilas un stacionāras superkondensatoru enerģijas uzkrājēju sistēmas izmantošanas efektivitātes salīdzinājums

Stacionāras EUS gadījumā no vienas puses trolejbuss ir ar mazāku masu un noslodzi salīdzinājumā ar mobilas EUS gadījumu, tomēr vajadzētu pārliecināties, cik lielu ietekmi uz stacionāras EUS izmantošanas efektivitāti atstāj elektropārvadē zaudētā enerģija uzlādes un izlādes režīmos. Tiks salīdzināta līdz šim aplūkotās mobilās SC EUS (EUS2) izmantošanas efektivitāte ar identiskas stacionāras EUS (208 SC šūnas, $C = 65,38$ F, $V_{\min} = 156$ V utt.) izmantošanas efektivitāti, un šī stacionārā EUS ir ierīkota apakšstacijā. Vispirms tika pieņemts, ka konkrētajā gadījumā trolejbuss veic bremsēšanu no 50 km/h ātruma, un apstāšanās brīdī tas atrodas 1,5 km attālumā no apakšstacijas. Pēc tam trolejbuss atkal uzsāk kustību, paātrinādamies līdz 50 km/h, attālinādamies projām no apakšstacijas. Tika izmantota SC izlādes "stratēģija A", kur jau sākot ar kustības uzsākšanu, 50 % no trolejbusa piedziņai nepieciešamās jaudas nodrošina EUS, atlikušos 50 % - apakšstacija.

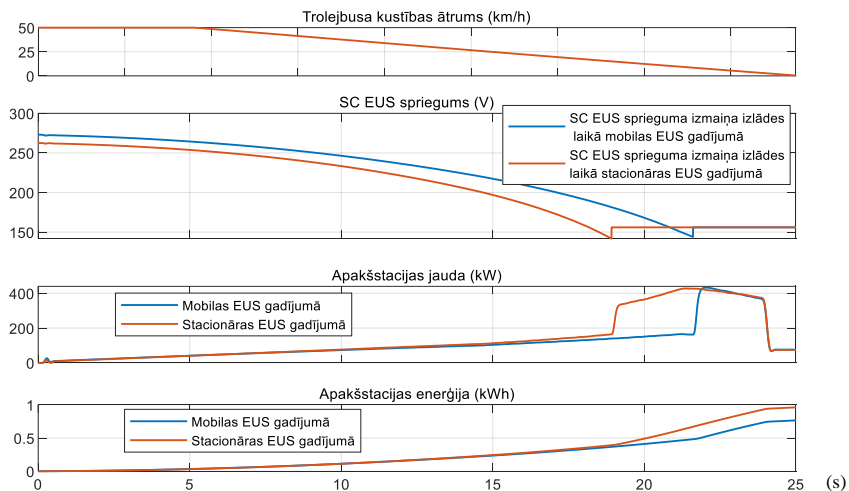
Salīdzināšanas mērķis bija noskaidrot, cik lielā mērā mobilas EUS gadījumā rekuperētā enerģija tiek izmantota efektīvāk nekā stacionāras EUS gadījumā. Uzreiz ir saprotams, ka stacionāras EUS gadījumā bremsēšanas režīma laikā daļa rekuperētās enerģijas tiek zaudēta elektropārvadē, un ātruma uzņemšanas režīmā arī daļa no EUS ņemtās enerģijas tiek zaudēta elektropārvadē. Minēto elektropārvades zudumu apjoms ir atkarīgs no attāluma starp apakšstaciju un trolejbusu, un jo šis attālums ir lielāks, jo mobila EUS būs efektīvāka salīdzinājumā ar stacionāru EUS. Stacionāras EUS efektivitāte mobilas EUS efektivitātei var līdzināties tad, ja trolejbuss atrodas ļoti tuvu apakšstacijai.

Vispirms tika veikta trolejbusa kustības simulācijas ar mobilas/stacionāras EUS uzlādi, un 3.41. attēlā vienā plaknē salīdzināti simulāciju rezultāti. Uzlādes režīmā stacionārā EUS elektropārvades zudumu dēļ tika uzkrāts par 10,3 % mazāk enerģijas nekā mobilā EUS. Bremsēšanas laikā mobilā EUS uzlādējās līdz 273 V, stacionārā – līdz 262,5 V, un šīs pašas vērtības tika izmantotas kā SC EUS sākotnējie uzlādes stāvokļu spriegumi nākamā ieskrējiena režīmā. 3.42. attēlā var redzēt, ka stacionāra EUS izlādējas ātrāk, kad trolejbuss paātrinās līdz 50 km/h, un tā rezultātā pilnais apakšstacijas enerģijas patēriņš stacionāras EUS gadījumā bija

par aptuveni 27 % augstāks nekā mobilas EUS gadījumā. Tātad pie garākiem attālumiem starp apakšstaciju un trolejbusu, kas konkrētajā gadījumā bija 1,5 km, mobila EUS ir manāmi efektīvāka salīdzinājumā ar stacionāro EUS.



3.41. att. Mobilas un stacionāras EUS uzlādes režīma simulāciju rezultāti, kad apstāšanās brīdī attālums starp apakšstaciju un trolejbusu ir 1,5 km.



3.42. att. Mobilas un stacionāras EUS izlādes režīma simulāciju rezultāti, kad kustības uzsākšanas brīdī attālums starp apakšstaciju un trolejbusu ir 1,5 km.

Tika veiktas līdzīgas simulācijas gadījumiem, kur minēto 1,5 km vietā attālumi starp apakšstaciju un trolejbusu ir īsāki, proti, 1 km, 0,5 km un 0 km, lai pārlicinātos, ka pie īsākiem attālumiem atšķirība starp mobilas un stacionāras EUS efektivitāti samazinās. Rezultātā tika noskaidrots, ka pie 1 km attāluma stacionāras EUS gadījumā bremsēšanas režīmā tika uzkrāts

par 7,5 % mazāk enerģijas nekā mobilas EUS gadījumā, un apakšstacijas pilnais enerģijas patēriņš stacionāras EUS gadījumā bija par 15,7 % augstāks nekā mobilas EUS gadījumā. Savukārt pie 0,5 km attāluma stacionāras EUS gadījumā bremsēšanas režīmā tika uzkrāts par 5,2 % mazāk enerģijas nekā mobilas EUS gadījumā, un apakšstacijas pilnais enerģijas patēriņš stacionāras EUS gadījumā bija par 7 % augstāks nekā mobilas EUS gadījumā.

3.8. Mobilas superkondensatoru enerģijas uzkrājeju sistēmas izmantošanas rezultātā ietaupīto finansiālo līdzekļu aprēķins

Mobilas SC EUS izmantošanas sākuma posmu var uzskatīt par atmaksas periodu, kas ilgst līdz tam brīdim, kad šīs EUS izmantošanas rezultātā veiksmīgi izmantotās trolejbusa rekuperētās enerģijas apjoms naudas izteiksmē atbilst EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksām. Pēc minētā atmaksas perioda var sacīt, ka EUS “nes peļņu” uz turpmāk izmantotās rekuperētās enerģijas cenas rēķina, salīdzinot ar gadījumu bez EUS, kad visa rekuperētā enerģija tiktu izkliedēta.

Tomēr jāņem vērā to, ka reālā satiksmē trolejbusam samērā reti ir tāda ideāla trapeceida ātruma līkne, kas ietver vienmērīgu paātrinājumu, kustību ar vienmērīgu ātrumu un bremsēšanu, kāda tika izmantota līdz šim, sākot no elektropārvades zudumu simulēšanas un beidzot ar EUS aprēķināšanu un simulēšanu. Pastāv bezgalīgi daudz trolejbusa kustības ciklu varianti, piemēram, dažāds pasažieru skaits – noslodze, nevienmērīgi paātrinājumi līdz dažādiem ātrumiem, ne tikai līdz maksimālajam 50 km/h, nevienmērīgas bremsēšanas, utt. Līdz ar to ir jāsecina, ka kopumā nav iespējams veikt absolūti precīzus aprēķinus par EUS kalpošanas laiku un paredzamo uzlādes/izlādes ciklu skaitu. Tomēr tika izvirzīts priekšlikums, kā tuvināti aprēķināt pilno enerģijas apjomu, kādu EUS var uzkrāt visā eksploataācijas 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 %. Tālāk, zinot šo pilno enerģijas apjomu, var aprēķināt aptuvenu veiksmīgi izmantotās enerģijas apjomu un līdz ar to arī EUS eksploataācijas laikā nestās peļņas apjomu. Precīzu laiku gados, kādā aprēķinātais enerģijas apjoms tiek izlaists cauri EUS, aprēķināt diemžēl nav iespējams – to varētu tikai aptuveni prognozēt, analizējot reāllaikā ierakstītus trolejbusa kustības ātruma, patērētās jaudas un rekuperētās jaudas mērījumu datus konkrētos maršrutos.

Tā kā iepriekšējās apakšnodalās EUS1 un EUS2 tika rēķinātas un plānotas trolejbusam 27Tr, kas pilnībā piepildīts ar pasažieriem, turpmāk aprakstītās EUS nestās peļņas aprēķinam tiks izmantots pilns 27Tr, kas ieskrējienu līdz 50 km/h un bremsēšanu veic vienu miljonu reižu – tieši tik reizes SC šūna var tikt uzlādēta/izlādēta, kas skaitās kā darbmūžs. Saskaņā ar ražotāja sniegto informāciju šis viena miliona uzlādes/izlādes ciklu skaits attiecas uz pilnu uzlādi/izlādi, taču jāatgādina, ka trolejbusa gadījumā mobilā SC EUS nekad netiek izlādēta pilnībā, bet līdz pusei no maksimālā sprieguma, t.i. $V_{\min} = 0,5 V_{\max}$. Taču mobilās SC EUS darba temperatūra var būt arī virs nominālajiem 25 °C, tādējādi paātrinot SC šūnu nolietošanu, tāpēc 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 vienu pilnu uzlādes/izlādes ciklu.

Jāsecina, ka līdz pusei ar pasažieriem piepildīta 27Tr gadījumā, kad tiek gan rekuperēti, gan patērēti mazāki enerģijas apjomi, dotā EUS kalpos vairāk par vienu miljonu uzlādes/izlādes ciklu, bet no enerģijas uzkrāšanas viedokļa var uzskatīt, ka līdz pusei ar pasažieriem piepildīta 27Tr gadījumā EUS visa darbmūža laikā tiks uzkrāts tik pat daudz enerģijas, cik pilnībā ar pasažieriem piepildīta 27Tr gadījumā.

3.8.1. Superkondensatoru ekspluatācijas laikā veiksmīgi izmantotās trolejbusa rekuperētās enerģijas aptuvenš aprēķins

Prognozējot attiecīgas EUS nestās peļņas, kas uzsāk rasties pēc atmaksas perioda izešanas, apjomu EUS darbmūža laikā, pirmais solis ir noskaidrot aptuvenu kopējās elektriskās enerģijas apjomu, kādu trolejbuss rekuperē, miljons reižu bremsēdams no 50 km/h ātruma, lai pēc tam varētu aprēķināt šī kopējā enerģijas apjoma pilno cenu. Kā tika noskaidrots simulācijās, vienas šādas bremsēšanas laikā pilnībā ar pasažieriem piepildīts trolejbuss Škoda 27Tr rekuperē aptuveni 0,562 kWh enerģijas. Līdz ar to miljons reizēs pilns 27Tr rekuperē 562 000 kWh enerģijas. Pieņemot, ka cena par 1 kWh ir, piemēram, 0,15 eiro, tad aprēķinātā rekuperētās enerģijas apjoma cena atbilst 84 300 eiro, kas ir pietiekami liela summa, lai apsvērtu iespēju izmantot mobilu SC EUS, pateicoties kurai varētu samazināt pilno apakšstacijas enerģijas patēriņu, kura pilnā cena atbilstu daļai no šiem 84 300 eiro. Saprotsams, ka faktiskā ietaupītās enerģijas cena būs zemāka par minēto summu, ņemot vērā iepriekšējo apakšnodaļu ietvaros detalizēti aprakstītos rekuperētās enerģijas zudumus invertorā, impulsu pārveidotājā, kā arī zudumus SC iekšējās pretestības dēļ.

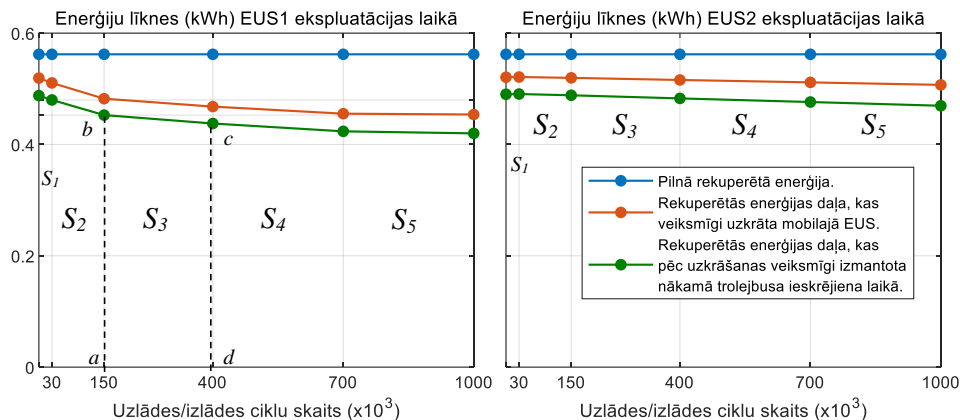
Tāpēc nākamais solis ir aprēķināt cenu tai rekuperētās enerģijas daļai, kas attiecīgas EUS darbmūža laikā veiksmīgi tiek izmantota trolejbusa piedziņas ieskrējiena režīmā, kas seko pēc bremsēšanas jeb enerģijas uzkrāšanas režīma. Aplūkosim un salīdzināsim iepriekš aprēķināto 27Tr variantu EUS1 (3.2. tabula), un EUS2 (3.3. tabula) gadījumus.

3.43. attēlā pilna 27Tr gadījumam parādīta bremsēšanas no 50 km/h ātruma laikā pilnās rekuperētās enerģijas līkne, rekuperētās enerģijas līkne, kas veiksmīgi uzkrāta un aprēķināta pēc 3.21. formulas E_c daļas, un rekuperētās enerģijas līkne, kas veiksmīgi izmantota pēc bremsēšanas sekojošā paātrinājuma laikā EUS1 un EUS2 variantiem no pirmā līdz miljonam uzlādes/izlādes ciklam un aprēķināta pēc 3.32. formulas. Ar iegūto zaļo līkņu palīdzību var aprēķināt pilno veiksmīgi izmantoto rekuperēto enerģiju visā EUS ekspluatācijas laikā, jo šai enerģijai atbilst plaknes laukums, kas ir zem zaļās līknes. Izmantojot trapeču metodi, var aprēķināt kopējo enerģijas apjomu, kādu pēc bremsēšanas režīmiem vilces piedziņa izmanto nākamajos ieskrējiena režīmos EUS darbmūža laikā jeb viena miliona uzlādes/izlādes reižu laikā. Veiksmīgi realizētās rekuperētās enerģijas līknes iekļaujošais laukums tiek sadalīts piecās trapecēs, kurām katrai atsevišķi tiek aprēķināti laukumi, kas pēc tam tiek sasummēti. Par piemēru 3.38. attēlā aplūkosim 27Tr EUS1 gadījumu, kur plaknes laukums zem zaļās līknes ir sadalīts piecās daļās. Piemēram, laukums S_3 tiek aprēķināts pēc trapeces laukuma izteiksmes:

$$S_3 = E_{EUS_S3(kWh)} = \left(\frac{ab + cd}{2} \right) ad, \quad (3.44.)$$

kur $ab = 0,4528$ – veiksmīgi absorbētās enerģijas apjoms 150. tūkstošajā ciklā, kWh;

$dc = 0,4377$ – veiksmīgi absorbētās enerģijas apjoms 400. tūkstošajā ciklā, kWh;
 $ad = 250$ – ciklu skaits starp 150 tūkst. un 400 tūkst. cikliem, cikli.



3.43. att. Veiksmīgi uzkrātās un veiksmīgi izmantotās rekuperētās enerģijas līknes mobilu EUS1 un EUS2 ekspluatācijas laikā pilnībā ar pasažieriem piepildītam 27Tr.

Tieši tādā pašā veidā aprēķina arī visu pārējo trapeču laukumus. Savukārt pilno lietderīgi izmantotās enerģijas apjomu aprēķina kā attiecīgo trapeču laukumu summu:

$$E_{EUS1} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5. \quad (3.45.)$$

Saskaņā ar aprēķinu rezultātiem EUS ekspluatācijas laikā veiksmīgi izmantotās kopējās enerģijas apjomi 27Tr gadījumam ir: $E_{EUS1} = 437\,552$ kWh (SC skaits:178); $E_{EUS2} = 514\,434$ kWh (SC skaits: 208). Minētie enerģijas apjomi ir uzskatāmi par rekuperētās enerģijas uzkrāšanas un izmantošanas rezultātā gūtiem “netiešiem” piedziņas enerģijas patēriņa ietaupījumiem, kas mobilas EUS neesamības gadījumā tiktu patērēti no apakšstacijas. EUS2 gadījumā, salīdzinot ar EUS1 gadījumu, veiksmīgi tiek izmantots par 43 058 kWh jeb 9,8 % vairāk enerģijas, kas ir uzskatāma par vērā ņemamu atšķirību. Šis ir papildus arguments jau iepriekš izdarītajam secinājumam, ka pie mobilas SC EUS plānošanas paredzamā energoietilpība ir jāaprēķina pēc 3.14. formulas, lai būtu lielāks enerģijas ietaupījums visā SC EUS ekspluatācijas laikā. Tāpēc turpmāk arī tiks aplūkots EUS2 variants.

3.8.2. Superkondensatoru izmantošanas rezultātā prognozējamās nestās peļņas aprēķins

Kā tika minēts iepriekš, EUS ekspluatācijas sākumā notiek tās iegādes un uzstādīšanas izmaksu atpelnīšana uz veiksmīgi izmantotās rekuperētās enerģijas rēķina. Izdevumus, kas saistīti ar EUS iegādi un uzstādīšanu, var uzskatīt par atpelnītiem tajā momentā, kad kopš ekspluatācijas sākuma veiksmīgi izmantotās rekuperētās enerģijas apjomam atbilstošā naudas summa ir vienāda ar EUS sākotnējo izmaksu un uzstādīšanas izdevumu summu, kas ir atkarīga no diviem galvenajiem parametriem, kurus ne vienmēr var viennozīmīgi prognozēt. EUS

kopējās izmaksas veido SC elementu cena, impulsu pārveidotāja cena, kā arī instalācijas izmaksas. Tā kā impulsu pārveidotājus var nākties izstrādāt pēc speciāla pasūtījuma priekš konkrētā gadījuma, ir ļoti sarežģīti paredzēt tā cenu. Kopējā EUS cena tiek aprēķināta pēc formulas:

$$K_{EUS} = NK_{SC}k, \quad (3.46.)$$

kur N – SC šūnu skaits, gb.;

K_{SC} – vienas SC šūnas cena, eiro;

k – EUS cenas koeficients, kas iekļauj impulsu pārveidotāja cenu un EUS instalācijas izmaksas.

Tāpat kā [42] un [43], turpmāk tiks pieņemts, ka 3.46. formulā $k = 2$. Pēc EUS iegādes un uzstādīšanas izdevumu atpelnīšanas var uzskatīt, ka no tā brīža līdz pat SC šūnu ekspluatācijas beigām notiek peļņas gūšanas process uz izmantotās rekuperētās enerģijas rēķina. Enerģijas patēriņa samazinājumu naudas izteiksmē visā EUS ekspluatācijas laikā, ņemot vērā tikai piedziņas rekuperētās enerģijas izmantošanu, var aprēķināt ar formulu:

$$K_d = E_{EUS}K_{kWh} - K_{EUS}, \quad (3.47.)$$

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

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

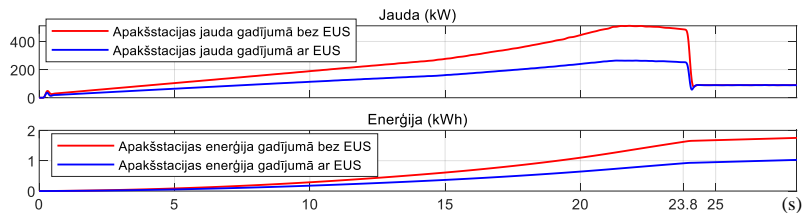
Tomēr ar 3.47. formulu vēl netiek aprēķināta enerģijas patēriņa summa naudas izteiksmē pilnajai apakšstacijas ietaupītajai enerģijai, kas iekļauj ne tikai ietaupīto piedziņas enerģiju jeb veiksmīgi izmantoto rekuperēto enerģiju E_{EUS} , bet arī elektropārvadē zaudētās enerģijas samazinājumu un apakšstacijas iekšējo zudumu enerģijas samazinājumu, pateicoties tam, ka no apakšstacijas tiek nodrošināts mazāks jaudas apjoms salīdzinājumā ar situāciju bez mobilas EUS. Jo mazāks jaudas apjoms tiek ņemts no apakšstacijas, jo mazāki būs arī pārvades zudumi.

Lai veiktu aprēķinu pilnajam apakšstacijas enerģijas patēriņa samazinājumam E_s naudas izteiksmē K_s pa visu EUS ekspluatācijas laiku, tika ierosināts vispirms veikt ar pasažieriem papildīta trolejbusa 27Tr bez mobilas EUS kustības simulāciju un reģistrēt apakšstacijas enerģijas patēriņu paātrināšanās režīma beigās, bet pēc tam – ar pasažieriem papildīta 27Tr ar mobilu EUS kustības simulāciju un reģistrēt apakšstacijas enerģijas patēriņu paātrināšanās režīma beigās. Starpība starp pirmo un otro gadījumu būs apakšstacijas pilnā ietaupītā enerģija E_s , un līdz ar to apakšstacijas pilnā enerģijas patēriņa samazinājumu naudas K_s izteiksmē visā EUS ekspluatācijas laikā var aprēķināt ar šādu formulu:

$$K_s = E_s K_{kWh} - K_{EUS}. \quad (3.48.)$$

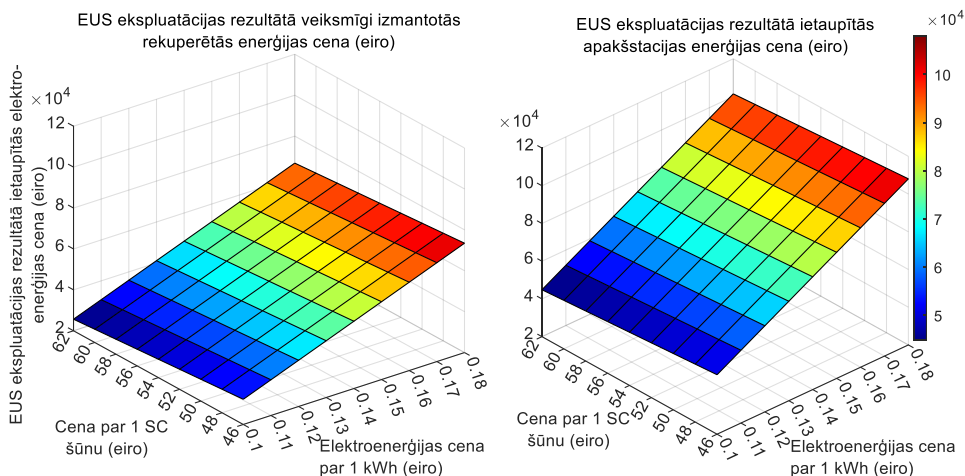
Saprotams, ka apakšstacijas enerģijas patēriņš būs dažāds pie dažādiem attālumiem starp apakšstaciju un trolejbusu, kas var būt līdz 2 km, taču priekš tuvinātiem aprēķiniem var pieņemt, ka vidējais apakšstacijas un trolejbusa savstarpējais attālums ir 1 km, tāpēc tika veikta ar pasažieriem papildīta 27Tr kustības simulācija situācijai, kur 27Tr atrodas 1 km attālumā no apakšstacijas. 3.44. attēlā redzami simulāciju rezultāti situācijām bez mobilas EUS un ar mobilu EUS, kas tika izlādēta saskaņā ar iepriekš aprakstīto konstantu izlādes proporcionalitātes stratēģiju visa paātrinājuma laikā. Saskaņā ar simulāciju rezultātiem apakšstacijas patērētās

enerģijas starpība starp abiem gadījumiem ir 0,7066 kWh. Līdz ar to, lai iegūtu apakšstacijas pilnā enerģijas ietaupījuma vērtību E_s visā EUS ekspluatācijas laikā, minētais skaitlis jāreizina ar 1 miljonu. Tad $E_s = 706\,600$ kWh, kas ir ievērojami vairāk nekā veiksmīgi izmantotās rekuperētās enerģijas apjoms $E_{EUS} = 514\,434$ kWh.



3.44. att. Apakšstacijas jaudas un enerģijas patēriņa simulāciju rezultātu diagrammas.

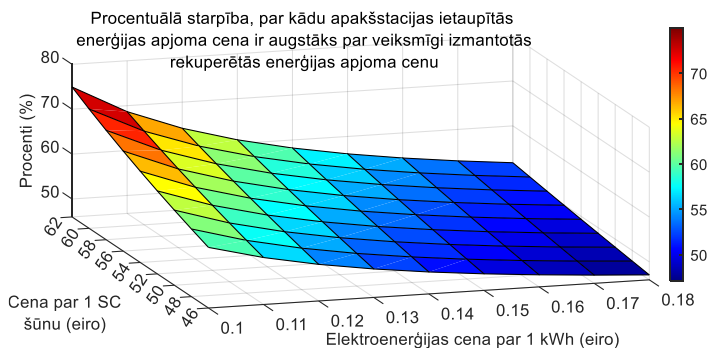
Ražotājs *SC* šūnu cenas internetā nepublicē, bet aptuvenu cenu diapazonu var iegūt no dažādu izplatītāju mājaslapām. Lai arī elektroenerģijas cena par vienu kWh nav nemainīga, bet ik pa laikam mainās, var paredzēt aptuvenas izmaiņu diapazona robežas. EUS nesto peļņu apjomi ekspluatācijas laikā tika aprēķināti, pieņemot, ka elektroenerģijas cena par kWh var mainīties robežās no 0,1 līdz 0,18 eiro, un vienas *SC* šūnas iespējamā cena var mainīties robežās no 46 līdz 62 eiro. 3.45. attēla kreisajā pusē parādīts EUS nestās peļņas apjoms, kas aprēķināts ar 3.47. formulu, ņemot vērā tikai veiksmīgi izmantoto rekuperēto enerģiju, bet labajā pusē – EUS nestās peļņas apjoms, kas aprēķināts ar 3.48. formulu, ņemot vērā apakšstacijas pilno enerģijas ietaupījumu. EUS “nestā peļņa” ir jāsaprot nevis kā tieši finansiāli ienākumi, bet kā elektroenerģijas patēriņa rēķinu izmaksu samazinājums, salīdzinot ar situāciju bez EUS.



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

Tāpat finansiālo līdzekļu ietaupījums ir manāmāks, ja aprēķinos ņem vērā ne tikai veiksmīgi izmantoto rekuperēto enerģiju, bet gan pilno apakšstacijas enerģijas patēriņa samazinājumu, skatoties uz atšķirību salīdzināšanas grafiku 3.46. attēlā, kur redzams, ka procentuālā starpība,

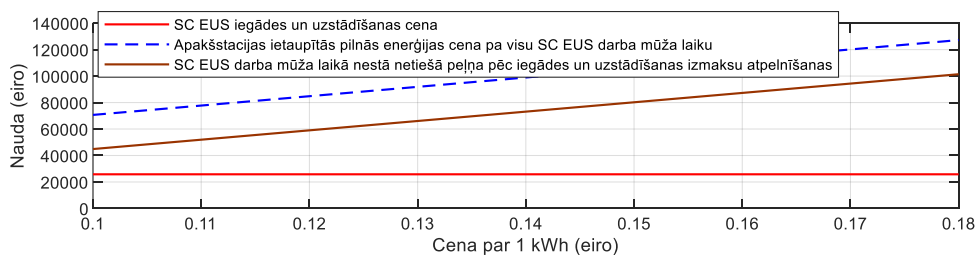
par kādu EUS izmantošanas rezultātā apakšstacijas ietaupītās enerģijas cena ir augstāka par veiksmīgi izmantotās rekuperētās enerģijas cenu, ir augstāka pie zemākām elektroenerģijas cenām un augstākām SC šūnu jeb EUS kopējām iegādes/uzstādīšanas cenām.



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

Cena par vienu SC šūnu un elektroenerģijas cena par 1 kWh tika noteikti par mainīgiem lielumiem, tādējādi iegūstot trīs dimensiju grafikus. Skatoties uz 3.45. attēlu, var redzēt, ka EUS finansiālo atdevi būtiskāk ietekmē elektroenerģijas cena par 1 kWh nekā EUS kopējā cena. Kur trīsdimensiju grafiks 3.45. attēlā ir dzeltenā-oranžā-sarkanā krāsā, tur ir visaugstākā atdeve, tātad - pie augstākām elektroenerģijas cenām. No tā izriet, ka rekuperētās enerģijas izmantošana ar EUS palīdzību var būt finansiāli ļoti izdevīga elektroenerģijas cenas inflācijas gadījumos, taču pie elektroenerģijas cenas samazināšanās jeb deflācijas EUS atmaksas periods būs ilgāks un pēc tā sekojošā finansiālā atdevē jeb ietaupītās enerģijas apjoma cena būs mazāka.

3.47. attēlā piemēra pēc parādīta konstanta SC EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksu līkne K_{EUS} , kas aprēķināta ar 3.46. formulu gadījumam ar maksimālo 62 eiro cenu par 1 SC šūnu, naudā izteikta apakšstacijas pilnā enerģijas ietaupījuma līkne $E_S K_{kWh}$ visā SC EUS darbmūžā un SC EUS darbmūža laikā nestā netiešās peļņas līkne pēc iegādes un uzstādīšanas izmaksu atpelnīšanas K_S , kas aprēķināta ar 3.48. formulu vai arī kā $E_S K_{kWh}$ un K_{EUS} starpība. Var redzēt, ka SC EUS nestā netiešā peļņa, kas atbilst ietaupītās enerģijas cenai, kurai ir atrēķināta nost EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksu atpelnīšanas periodā ietaupītās enerģijas cena, manāmi pārsniedz EUS iegādes un uzstādīšanas izmaksas. Turklāt pie zemākām EUS cenām (piemēram, minimālajiem 46 eiro par 1 SC šūnu) šīs atšķirības būtu vēl ievērojamākas.



3.47. att. SC EUS darbmūža laikā nestās netiešās peļņas līkne pret elektroenerģijas cenu.

3.9. Secinājumi

Tika izstrādāta trolejbusa mobilas SC EUS impulsu pārveidotāja darbības rezultātu simulēšanas metode ar strāvas avotu izmantošanu, veicot pārveidotāja ieejas/izejas parametru aprēķinus. Šādā gadījumā nav nepieciešams izstrādāt un izmantot sarežģītākus pārveidotāja modeļus, kas ietver komutācijas procesu simulēšanu un PI/PID regulatoru izmantošanu.

Aprēķinos un simulācijās tika noskaidrots, ka, ja izvēlas tādu EUS, kuras sākotnējā energoietilpība ir vienāda ar pilna trolejbusa no 50 km/h rekuperētās enerģijas apjomu, tad jau pēc 30 tūkstošiem pilnu uzlādes/izlādes ciklu EUS SC kapacitāte/ietilpība ir pietiekami samazinājusies, ka tās uzlādes spriegums sasniedz maksimumu jau pirms bremsēšanas beigām un daļu rekuperētās enerģijas nākas izkliedēt bremsžu rezistorā. Tāpēc izvēlētais mobilās EUS sākotnējai energoietilpībai ir jābūt par noteiktu rezerves apjomu augstākai salīdzinājumā ar maksimāli iespējamo rekuperēto enerģiju, lai EUS ekspluatācijas laikā rekuperētā enerģija nebūtu jānovada uz bremsžu rezistoriem, un tika izstrādāta metode, kā šo apjomu aprēķināt.

Tika izstrādāta rekuperētās enerģijas uzkrāšanas un izmantošanas efektivitātes aprēķināšanas metode atkarībā no invertora un impulsu pārveidotāja kopējās efektivitātes un no SC šūnu nolietojuma. Minētās iekārtas ir ieteicams izvēlēties ar pēc iespējas augstākiem lietderības koeficientiem, jo rekuperētā enerģija katrai no tām plūst cauri divas reizes viena pilna EUS uzlādes/izlādes cikla laikā.

Trolejbusa paātrināšanās režīma beigu posmā ir augstāks jaudas patēriņš un attiecīgi augstāki pārvades zudumi, kurus iespējams novērst ar EUS izmantošanu. Salīdzinot dažādas EUS izlādes stratēģijas, kur EUS piedalās jaudas apgādē un izlādējas paātrināšanās beigu momentā, var secināt, ka tās savā starpā ir gandrīz līdzvērtīgas un ir par 8 % efektīvākas par gadījumu, kad EUS izlādējas pirms paātrināšanās režīma beigām.

Ar eksperimentālām simulācijām tika noskaidrots, ka, lai arī papildus mobilas EUS masas dēļ trolejbusa piedziņas enerģijas patēriņš palielinās līdz 5 %, tomēr apakšstacijas pilnais enerģijas patēriņš, pateicoties rekuperētās enerģijas uzkrāšanai EUS un izmantošanai, var samazināties līdz pat 50 %. Pie lielākiem attālumiem starp trolejbusu un apakšstaciju, kas šajā darbā bija 1,5 km, mobilas EUS ir aptuveni 27 % efektīvākas par stacionārām, jo stacionāru EUS gadījumā elektropārvadē tiek zaudēta enerģija gan EUS uzlādes, gan izlādes režīmos. Savukārt pie mazākiem attālumiem šī atšķirība attiecīgi samazinās.

Mēģinot paredzēt EUS izmantošanas rezultātā ietaupītās enerģijas pilno cenu, jāņem vērā, ka sākumā ir atmaksas periods, kas ilgst līdz brīdim, kad izmantotās rekuperētās enerģijas apjomam atbilstošā naudas summa ir vienāda ar EUS iegādes un uztādīšanas izmaksām. Apakšstacijas pilno enerģijas ietaupījumu var aprēķināt tuvināti, pieņemot kādu vidējo attālumu starp apakšstaciju un trolejbusu, jo, faktiski, trolejbusam pārvietojoties, novērstās elektropārvadē zaudētās enerģijas apjoms būs mainīgs. Izteikti augstāka ietaupītās enerģijas cena ir manāma tieši pie augstākām elektroenerģijas cenām, nevis pie zemākām SC iegādes izmaksām.

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

Atsevišķās situācijās var būt nepieciešamība elektriskā transportlīdzekļa mobilu SC EUS vai pie gaisvadu kontakttīkla pieslēgtu stacionāru SC EUS uzlādēt no kontakttīkla, ko var veikt, piemēram, ar konstantas strāvas vai konstantas jaudas režīmu. Sākotnēji varētu rasties priekšstats, ka abām metodēm efektivitātes ziņā vajadzētu būt identiskām, ja ir vienādi robežu nosacījumi, proti, SC uzlādes sākotnējie un beigu spriegumi un uzlādes ilgumi. Tāpēc nepieciešams salīdzināt abas metodes uz iepriekšējā nodaļā izmantotā RC (piemēram, 4.2. attēlā redzamā rezistora R un kondensatora C virknes slēguma) modeļa bāzes, veicot gan uzlādes, gan izlādes, jo līdz šim šāda veida salīdzinājums nav veikts.

Visplašāk izmantotais reālu SC aizvietojošais RC modelis ir ļoti vienkāršs, taču negarantē pilnīgu precizitāti, tāpēc ir izstrādāti arī dažādi citi sarežģītāki SC matemātiskie modeļi, piemēram, Zubieta, Faranda, divu zaru ķēdes utt. [50], [51], [52], [53]. Salīdzinot trīs dažādu SC matemātisko modeļu darbības precizitātes attiecībā pret reālu SC, ticis konstatēts, ka RC modelis ir ar augstāku kļūdu salīdzinājumā ar citiem modeļiem [54]. Taču saskaņā ar simulāciju rezultātu līkņēm RC modelis ir par aptuveni 5% neprecīzāks salīdzinājumā ar citiem modeļiem, un šo atšķirību var uzskatīt par pietiekami pieļaujamu, lai vienkāršotais RC modelis varētu tikt izmantots trolejbusa mobilas SC EUS aprēķināšanā, plānošanā un darbības virtuālā simulēšanā, kā tika darīts iepriekšējās nodaļas ietvaros. Turklāt RC modelis ir vispārpieņemts un plaši izmantots priekš liela mēroga SC EUS plānošanas, aprēķināšanas un modelēšanas [55].

4.1. Izvirzītie nosacījumi superkondensatoru ķēdes uzlādēm/izlādēm

Turpmākie aprēķini, simulācijas un eksperimenti tika veikti, izmantojot pieejamu SC slēgumu, kas redzams 4.1. attēlā, sastāvošu no 20 virknē slēgtām SC šūnām Maxwell BCAP0450 P270 S18. Vadoties pēc tehniskās dokumentācijas, vienas SC šūnas kapacitāte $C = 450$ F, iekšējā pretestība $R = 2,8$ m Ω un maksimālais spriegums $V_C = 2,7$ V. Līdz ar to divdesmit SC šūnu virknes slēgumam $C = 22,5$ F, $R = 0,056$ Ω un $V_C = 54$ V. Lai arī šī SC slēguma energoietilpība un spriegums ir mazākos mērogos salīdzinājumā ar elektriska transportlīdzekļa mobilu SC EUS, tomēr beigās iegūtais secinājums par to, vai abas uzlādes/izlādes metodes ir vai nav vienlīdz efektīvas, attieksies arī uz jebkuru lielāka mēroga SC EUS.



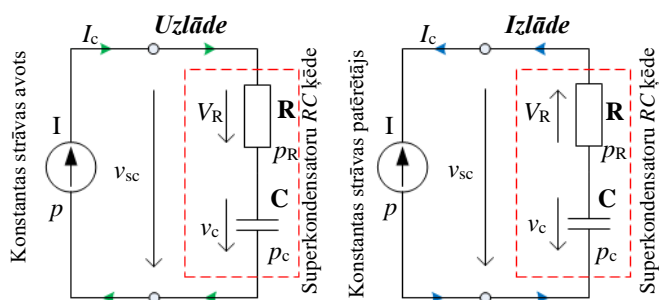
4.1. att. Superkondensatoru ķēde.

Tiks veikts SC slēguma uzlādes ar konstantu strāvu un uzlādes ar konstantu padoto jaudu salīdzinājums, simulējot SC slēguma uzlādes no sākotnējā sprieguma $V_{C1} = 27$ V līdz uzlādes beigu spriegumam $V_{C2} = 54$ V vienādos laikos $t = 25$ s. Līdzīgi tika veikts SC slēguma izlādes ar konstantu strāvu un izlādes ar konstantu patērēto jaudu salīdzinājums, simulējot SC slēguma izlādes no sākotnējā sprieguma $V_{C1} = 54$ V līdz izlādes beigu spriegumam $V_{C2} = 27$ V vienādos laikos $t = 25$ s. Abas uzlādes/izlādes metodes tiks salīdzinātas gan veicot aprēķinus un virtuālas simulācijas uz RC modeļa bāzes, gan veicot praktiskus eksperimentus, taču vispirms tiks veikts metožu teorētiskais apraksts.

4.2. SC ķēdes uzlādēšana/izlādēšana ar konstantu strāvu

Strāvu plūsmas SC slēgumam ekvivalentajā RC ķēdē uzlādes un izlādes laikā redzamas 4.2. attēlā. Konstantie uzlādes/izlādes parametri kā, piemēram, uzlādes/izlādes strāva I_C ir apzīmēti ar lielajiem burtiem, bet mainīgie parametri – ar mazajiem burtiem. SC iekšējās pretestības R dēļ izraisītais sprieguma kritums V_R konstantas strāvas plūsmas gadījumā ir konstants lielums. *Matlab* modelī uzlāde/izlāde tiek simulēta, izmantojot 3.5. attēla mobilas EUS daļai līdzīgu blokshēmu ar strāvas avotu, kam reāllaikā tiek iestatīta attiecīga strāva, kas uzlādes gadījumā ir pozitīva, izlādes gadījumā – negatīva. Uzlādes gadījumā strāva I_C plūst virzienā uz C , tāpēc potenciāli uz R un C ir vērsti vienādos virzienos. Izlādes gadījumā strāva I_C plūst virzienā prom no C , tāpēc potenciāli uz R un C ir ar savstarpēji pretējiem virzieniem un kondensatora elementu C var uzskatīt par enerģijas jeb strāvas avotu. Ņemot vērā iepriekš minēto, var secināt, ka mērot spriegumu reālai SC ķēdei, paralēli pieslēgts voltmētrs uzlādes gadījumā uzrādīs tādu vērtību v_{SC} , kas ir par V_R augstāka nekā slēguma faktiskā vērtība v_C :

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



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

Uzlādes procesam beidzoties, voltmētrs uzrādīs slēguma sprieguma faktisko vērtību v_C , kā redzams 4.3. attēlā. Savukārt izlādes gadījumā voltmētrs uzrādīs tādu vērtību v_{SC} , kas ir par V_R zemāka nekā slēguma sprieguma faktiskā vērtība v_C , bet izlādes procesam beidzoties, voltmētrs uzrādīs slēguma faktisko vērtību, kā redzams 4.4. attēlā. Līdz ar to paralēli RC slēgumam pieslēgta voltmetra uzrādītā vērtība ir:

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

Voltmetra uzrādīto vērtību mēdz saukt par SC slēguma ārējo spriegumu, kas uzlādes gadījumā ir V_C un V_R summa, un izlādes gadījumā ir V_C un V_R starpība, bet faktisko spriegumu V_C – par SC slēguma iekšējo spriegumu. Lai aprēķinātu konstantu strāvu, ar kādu jālādē SC slēgums, lai tas noteiktā laikā t uzlādētos no sākotnēja sprieguma V_{C1} līdz beigu spriegumam V_{C2} , var izmantot kapacitātes C definīcijas formulu, kur q ir SC ķēdei pievadītais elektriskais lādiņš un ΔV ir sprieguma izmaiņa laikā t kā starpība starp V_{C2} un V_{C1} :

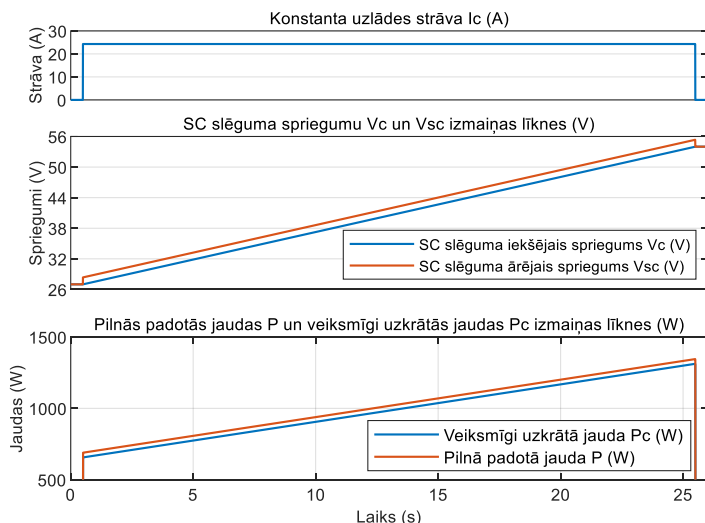
$$C = \frac{q}{\Delta V} = \frac{I_C t}{V_{C2} - V_{C1}}. \quad (4.3.)$$

No 4.3. izteiksmes var izvest konstantās uzlādes strāvas aprēķināšanas formulu:

$$I_C = \frac{C(V_{C2} - V_{C1})}{t}. \quad (4.4.)$$

Ar 4.4. formulu var aprēķināt un noskaidrot, ka dotais SC slēgums ir jāuzlādē ar 24.3 A strāvu, lai tas 25 sekunžu laikā no 27 V uzlādētos līdz 54 V. Datormodelī strāvas avotam uzlādes procesa laikā tiek uzdots konstanta strāva, kas aprēķināta ar 4.4. formulu, savukārt izlādes procesā tās pašas skaitliskās vērtības strāvai ir mīnusa zīme, jo tai ir pretējs plūšanas virziens.

Simulācijas rezultātu diagrammās 4.3. attēlā var redzēt, kā pie konstantas uzlādes strāvas SC slēguma iekšējais spriegums V_C pieaug lineāri. Tā kā spriegums V_R visu laiku ir konstants, tad ārējais spriegums V_{SC} visu uzlādes laiku ir par vienu un to pašu vērtību augstāks par V_C . Savukārt pilnā uzlādes jauda p visu uzlādes laiku palielinās lineāri un ir par vienu un no pašu vērtību augstāka nekā veiksmīgi uzkrātā jauda p_C .



4.3. att. SC uzlādes ar konstantu strāvu simulācijas rezultāti.

Lai aprēķinātu uzlādes procesa efektivitāti, ir jāzina gan veiksmīgi uzkrātā enerģija, gan pilnā padotā enerģija uzlādes laikā. Ja SC slēgums ar kapacitāti C tiek uzlādēts no sākotnējā sprieguma V_{C1} līdz beigu spriegumam V_{C2} , tad uzkrātā enerģija E_C ir aprēķināma pēc:

$$E_C = \frac{C(V_{C2}^2 - V_{C1}^2)}{2}. \quad (4.5.)$$

Tā kā uzlādes strāva I_C visu laiku ir konstanta, tad konstanta ir arī SC iekšējās pretestības R dēļ zaudētā jauda. Tāpēc enerģija, kas zaudēta visā uzlādes procesa laikā t , ir aprēķināma pēc:

$$E_R = I_C^2 R t. \quad (4.6.)$$

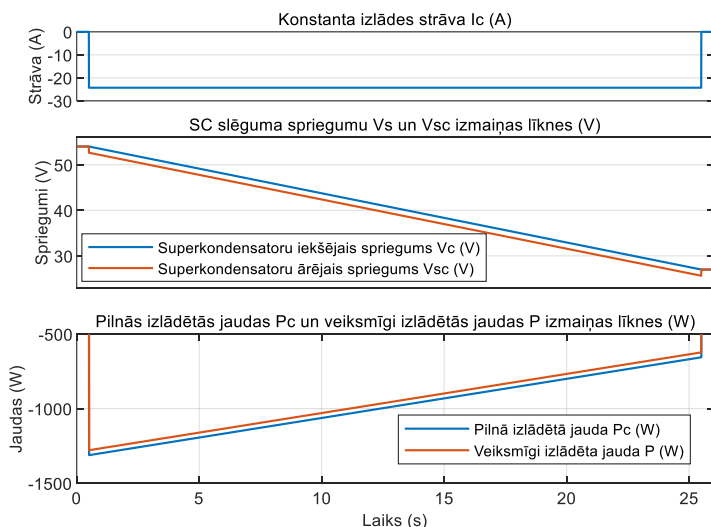
Pilnā enerģija E_{SC} , kas tiek novadīta uz SC slēgumu uzlādes procesa laikā, sastāv no uzkrātās enerģijas E_C un no zaudētās enerģijas E_R :

$$E_{SC} = E_C + E_R. \quad (4.7.)$$

Pilnā uzlādes procesa efektivitāte ir aprēķināma kā uzkrātās enerģijas E_C un pilnās uz SC slēgumu novadītās enerģijas E_{SC} dalījums:

$$\eta_C = \frac{E_C}{E_{SC}}. \quad (4.8.)$$

Atšķirībā no uzlādes procesa izlādes procesā SC slēguma sākotnējais spriegums ir augstāks par beigu spriegumu, tāpēc priekš izlādes laika t izlādes strāvu aprēķina pēc tās pašas 4.4. formulas, iegūstot strāvu ar tādu pašu skaitlisko vērtību kā uzlādes gadījumā, bet ar pretēju zīmi, jo tā plūst pretējā virzienā. SC slēguma izlādes procesa simulācijas rezultātu diagrammas parādītas 4.4. attēlā un ja šos rezultātus salīdzina ar 4.3. attēlā redzamajiem, tad var secināt, ka konstantas strāvas gadījumā uzlādes un izlādes procesi sanāk identiski, tikai pretējos virzienos.



4.4. att. SC izlādes ar konstantu strāvu simulācijas rezultāti.

Izlādes procesā zaudēto enerģiju aprēķina pēc tās pašas 4.6. formulas, savukārt enerģija E_S , kas no SC slēguma veiksmīgi sasniedz patērētāju, ir aprēķināma kā pilnās no SC slēguma izlādētās enerģijas E_C un zaudētās enerģijas E_R starpība:

$$E_S = E_C - E_R. \quad (4.9.)$$

Pilnā izlādes procesa efektivitāte ir aprēķināma kā veiksmīgi izlādētās enerģijas E_S un pilnās no SC slēguma izlādētās enerģijas E_C dalījums:

$$\eta_d = \frac{E_S}{E_C}. \quad (4.10.)$$

Savukārt pilno uzlādes/izlādes procesa efektivitāti, kad uzlāde no V_{C1} līdz V_{C2} un sekojošā izlāde no V_{C2} līdz V_{C1} notiek vienādos laikos, var aprēķināt kā veiksmīgi izlādētās enerģijas (4.9. formula) un pilnās uz SC slēgumu novadītās enerģijas (4.7. formula) dalījumu:

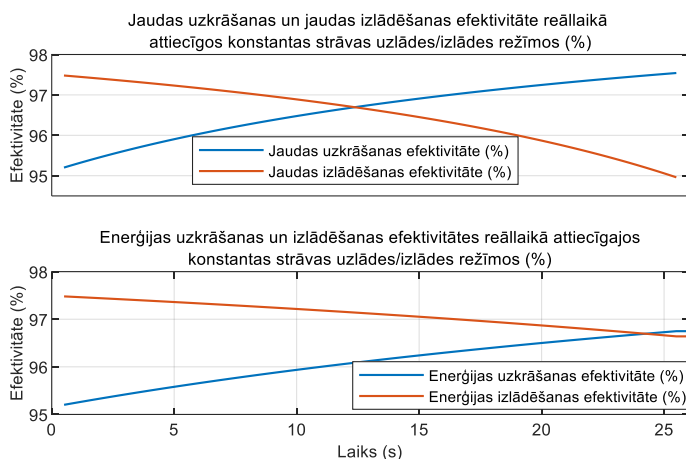
$$\eta_t = \frac{E_S}{E_{SC}}. \quad (4.11.)$$

Simulācijas laikā var uzņemt ar 4.8. un 4.11. izteiksmēm aprēķinātās enerģijas uzlādes un izlādes efektivitāšu momentāno vērtību līknes, kas parādītas 4.5. attēlā. Ir iespējams uzņemt arī jaudas uzkrāšanas efektivitātes momentāno vērtību līkni, kas aprēķināta ar formulu:

$$\eta_{Pch} = \frac{P_C}{P_C + P_R}. \quad (4.12.)$$

Savukārt jaudas izlādēšanas efektivitātes momentāno vērtību līkne tiek uzņemta, izmantojot formulu:

$$\eta_{Pdis} = \frac{P_C - P_R}{P_C}. \quad (4.13.)$$



4.5. att. Jaudas un enerģijas uzkrāšanas/izlādēšanas efektivitāšu simulāciju rezultāti.

Lai arī galvenās interesējošās vērtības ir enerģijas uzkrāšanas efektivitāte pašā uzlādes procesa beigu momentā un arī enerģijas izlādēšanas efektivitāte pašā izlādes procesa beigu momentā, 4.5. attēlā var vizuāli redzēt, kā uzlādes un/vai izlādes laikā mainās jaudas un enerģijas uzkrāšanas un/vai izlādēšanas efektivitāte. Uzlādes procesa sākuma momentā jaudas un enerģijas uzkrāšanas efektivitātes ir viszemākās, taču turpmāk tās pakāpeniski palielinās. Savukārt izlādes procesa sākuma momentā jaudas un enerģijas izlādēšanas efektivitātes ir visaugstākās, taču turpmāk tās pakāpeniski samazinās. Kā redzams, izlādes procesa pilnā efektivitāte ir nedaudz zemāka par uzlādes procesa pilno efektivitāti. Tas, ka uzlādes un izlādes procesi tomēr nav identiski efektivitāšu ziņā, ir izskaidrojams ar to, ka izlādes procesa gaitā pilnā izlādētā enerģija atbilst veiksmīgi uzkrātajai enerģijai uzlādes procesa gaitā, bet izlādes laikā no šīs enerģijas noteikta daļa tiek zaudēta iekšējās pretestības R dēļ. Savukārt uzlādes gadījumā zaudētā enerģija tiek kompensēta, ņemot attiecīgi vairāk enerģijas no avota. Arī matemātiski var pārlicināties, ka šīs efektivitāšu atšķirības lielums ir atkarīgs no iekšējās pretestības R .

4.3. Ieskats SC ķēdes uzlādēšanā/izlādēšanā ar konstantu spriegumu

Pastāv arī tāds fundamentāls SC uzlādēšanas/izlādēšanas variants, kā konstanta sprieguma pieslēgšana paralēli SC slēgumam [56]. Uzlādes gadījumā paralēli SC ķēdei pieslēgtais konstantais spriegums V_{SC} ir augstāks par SC sākotnējo spriegumu V_{C1} , bet izlādes gadījumā V_{SC} ir zemāks par V_{C1} . Sprieguma pieslēgšanas brīdī SC ārējais spriegums uzreiz kļūst vienāds ar paralēli pieslēgto spriegumu V_{SC} un notiek pārejas process, kura laikā SC iekšējais spriegums V_C eksponenciāli pieaug, līdz izlīdzinās, kļūdam aptuveni, bet ne absolūti vienāds ar V_{SC} , kā redzams 4.6. attēlā atsevišķajos konstanta sprieguma pakāpienos ar četrus soļus uzlādes piemēru. Iekšējo spriegumu V_C jebkurā laika momentā t kopš konstantā sprieguma V_{SC} pieslēgšanas var aprēķināt pēc formulas:

$$v_C = V_{out} + (V_{C1} - V_{SC})e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (4.14.)$$

Strāva i_C jebkurā laika momentā t ir aprēķināma pēc formulas:

$$i_C = \frac{V_{out} - V_{C1}}{R} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (4.15.)$$

Laiks, kādā SC slēguma iekšējais spriegums uzlādēsies no sākotnējā sprieguma V_{C1} līdz beigu spriegumam V_{C2} , ir aprēķināms pēc formulas:

$$t = -RC \ln\left(\frac{V_C - V_{SC}}{V_{C1} - V_{SC}}\right). \quad (4.16.)$$

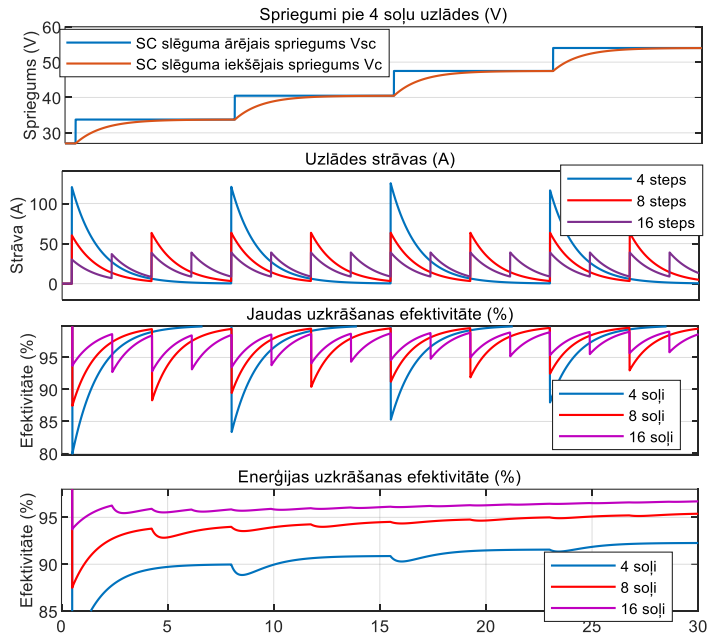
Zudumu jaudas vērtība laikā t ir aprēķināma pēc formulas:

$$P_R = \left(\left(\frac{V_{SC} - V_{C1}}{R}\right)e^{-\frac{t}{RC}}\right)^2 R. \quad (4.17.)$$

Integrējot 4.17. izteiksmi, var izvest zaudētās enerģijas E_R aprēķināšanas formulu:

$$E_R = \frac{(V_{SC} - V_{C1})^2 C}{2} \left(1 - e^{-\frac{2t}{RC}}\right). \quad (4.18.)$$

Ja izlāde ar konstantu spriegumu notiek trepītes veidā ar pakāpenisku sprieguma palielināšanu, tad efektivitātes paaugstināšanai šo pakāpienu skaitam jābūt pēc iespējas lielākam. Kā redzams 4.6. attēlā, pie lielākiem pakāpienu skaitiem strāvas pīķi samazinās, tādējādi palielinot efektivitāti. Palielinot pakāpienu skaitu vēl vairāk, strāvas pīķi nogludinātos, līdz sāktu līdzināties konstantas strāvas līknei. No tā var secināt, ka uzlāde/izlāde ar konstantu spriegumu jebkurā gadījumā ir neefektīvāka par uzlādi/izlādi ar konstantu strāvu, tāpēc turpmāk šis variants netiks aplūkots. Konstanta sprieguma uzlādi/izlādi var nodrošināt, piemēram, daudzfāžu divvirzienu līdzsprieguma pārveidotāji, tomēr galvenais to trūkums ir tāds, ka aizpildījuma koeficientu izmantošanai pastāv zināmi ierobežojumi atkarībā no fāžu skaita, proti, pieļaujami tikai tie aizpildījuma koeficientu diapazoni, pie kuriem strāvas pulsācijas ir ļoti mazas vai nav vispār.

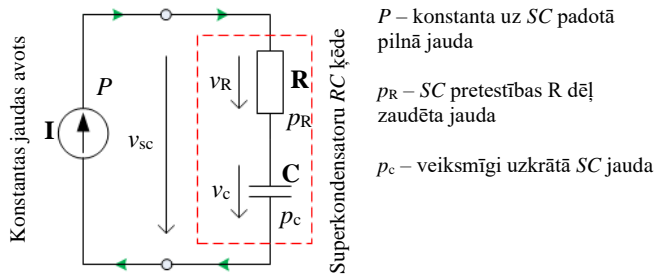


4.6. att. SC slēguma uzlāžu ar konstantiem spriegumiem simulāciju rezultāti.

4.4.SC ķēdes uzlādēšana/izlādēšana ar konstantu ieejas jaudu

Uzlāde

Konstantas padotās jaudas gadījumā vienīgais konstantais parametrs ir šī padotā jauda P , kas apzīmēta ar lielo burtu, bet pārējie parametri – uzlādes strāva i_C , sprieguma kritums v_R , iekšējais spriegums v_C – ir mainīgi lielumi, kas 4.7. attēlā apzīmēti ar mazajiem burtiem.



4.7. att. SC slēguma uzlādes ar konstantu padoto jaudu procesa shēma ar ekvivalentu RC ķēdi.

Tātad konstantā padotā jauda ir vienāda ar veiksmīgi uzkrātās jaudas p_c un zaudētās jaudas p_R summu:

$$P = p_c + p_R. \quad (4.19.)$$

Uzlādes gadījumam atbilstošais jaudu bilances vienādojums ir:

$$P = v_c i_c + i_c^2 R. \quad (4.20.)$$

Uzlādes procesa laikā starp strāvu i_c un kapacitāti C pastāv sakarība:

$$v'_c(t) = \frac{i_c}{C}. \quad (4.21.)$$

Izmantojot 4.20. izteiksmi 4.21. vienādojuma pārveidošanai, var iegūt šādu diferenciālvienādojumu:

$$RC^2 v'_c(t)^2 + C v_c v'_c(t) - P = 0. \quad (4.22.)$$

Izdalot 4.22. vienādojumu ar C , iegūst:

$$RC v'_c(t)^2 + v_c v'_c(t) - \frac{P}{C} = 0. \quad (4.23.)$$

4.23. kvadrātvienādojuma atrisinājums ir:

$$v'_c(t) = \frac{-v_c \pm \sqrt{v_c^2 + 4RP}}{2RC}. \quad (4.24.)$$

4.24. izteiksmes pareizais atrisinājums ir ar plusa zīmi pirms kvadrātsaknes. To var izspriest, 4.24. izteiksmi salīdzinot ar 4.21. izteiksmi, jo uzlādes strāvai jābūt pozitīvai. Tālāk no 4.24. formulas var izvest diferenciālvienādojumu uzlādes laika t aprēķināšanai:

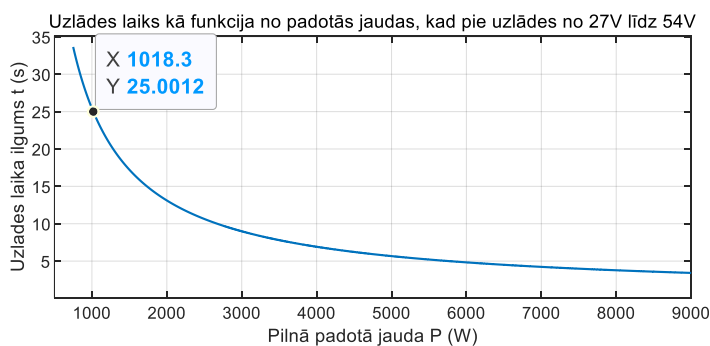
$$dt = \frac{2RC}{-v_c + \sqrt{v_c^2 + 4RP}} dv_c. \quad (4.25.)$$

Uzlādes laika t formula tiek izvesta pēc 4.25. izteiksmes integrēšanas, pieņemot, ka spriegums v_c mainās no V_{c1} līdz V_{c2} laikā t , pie nosacījuma, ka $V_{c1} < V_{c2}$, rezultātā iegūstot:

$$t = \frac{C}{4P} \left(V_{C2}^2 - V_{C1}^2 + V_{C2} \cdot \sqrt{4RP + V_{C2}^2} - V_{C1} \cdot \sqrt{4RP + V_{C1}^2} + 4RP \cdot \text{LN} \left(\frac{V_{C2} + \sqrt{4RP + V_{C2}^2}}{V_{C1} + \sqrt{4RP + V_{C1}^2}} \right) \right) \quad (4.26.)$$

Tātad nav problēmu aprēķināt uzlādes laiku t pie zināmas konstantas jaudas P , sākotnējā sprieguma V_{C1} un beigu sprieguma V_{C2} , pateicoties 4.26. vienādojumam. Dotās situācijas uzdevuma jautājuma formulējums būtu: “Cik ilgā laikā SC slēguma spriegums palielināsies no V_{C1} līdz V_{C2} , ja uz to tiks padota konstanta jauda P ?”.

Taču nākamais interesējošais variants ir nepieciešamās uz SC slēgumu padotās jaudas P aprēķināšana pie zināma uzlādes laika t , sākotnējā sprieguma V_{C1} un beigu sprieguma V_{C2} . Šāda uzdevuma jautājuma formulējums būtu: “Kāda konstanta jauda P jāpadod uz SC slēgumu, lai tas laikā t uzlādētos no V_{C1} līdz V_{C2} ?”. Diemžēl 4.26. vienādojums ir transcendents, un tas nozīmē, ka no šī vienādojuma konkrētu formulu jaudas P aprēķinam izvest nevar. Attiecībā uz izlādes gadījuma 4.37. vienādojumu, kas ir diezgan līdzīgs 4.26. vienādojumam, avotā [57] aprakstīta metode, kā var aprēķināt pārējos parametrus, kā i_C , v_C , v_R utt. reāllaikā, izmantojot Lamberta W funkciju, bet nav sniegts ieskats konstantas jaudas P aprēķinā atkarībā no noteikta laika t . Viens no jaudas P atrisināšanas variantiem ir matemātiskas skaitļošanas programmas, piemēram, Wolfram izmantošana, jo ievadot 4.26. vienādojumu ar attiecīgām zināmo parametru vērtībām, jaudas P skaitliskā vērtība tiek atrisināta. Otrs variants ir 4.26. vienādojuma atrisinājuma rezultātu tabulas izveidošana pie dažādām jaudām P , kurā pie attiecīgā uzlādes laika t var atrast atbilstošo jaudu P . Piemēram, var izveidot attiecīgu laika t vērtību masīvu, kur jauda P mainās no 750 W līdz 9000 W ar soli 0,1 W. Pie šādām P vērtībām uzlāde notiek aptuveni no 33,6 s līdz 3,6 s, un 4.8. attēlā redzama SC slēguma atbilstošā uzlādes laika līkne atkarībā no padotās konstantās jaudas P .



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

Gan P un t skaitļu masīvu tabulā, gan uz 4.8. attēlā redzamās uzlādes laika t diagrammas var atrast konkrētu interesējošo uzlādes laiku t un tad nolasīt atbilstošo jaudu P . Taču pie dotā jaudas izmaiņas soļa 0,1 W pastāv arī zināma atrisinājuma kļūda. Lai šo kļūdu samazinātu, P izmaiņas solis būtu jāsamazina vēl vairāk, tādējādi rezultātus tuvinot absolūti precīzajiem. Piemēram, meklējot jaudu P pie laika $t = 25$ s, atrastā uzlādes laika faktiskā vērtība ir aptuveni

25,0012 s, kā redzams 4.8. attēlā, un šai laika vērtībai atbilstoša jauda $P = 1018,3 \text{ W}$ arī tiek izvēlēta. Tomēr šī kļūda ir ļoti nenozīmīga, jo veido tikai tūkstošo daļu no sekundes.

Tā kā 4.26. izteiksmē ir zemsaknes izteiksmes, var uzskatīt, ka pastāv arī ierobežots konstantās padotās jaudas derīgo vērtību diapazons, kuru var noteikt, vispirms uzrakstot nevienādību sistēmu:

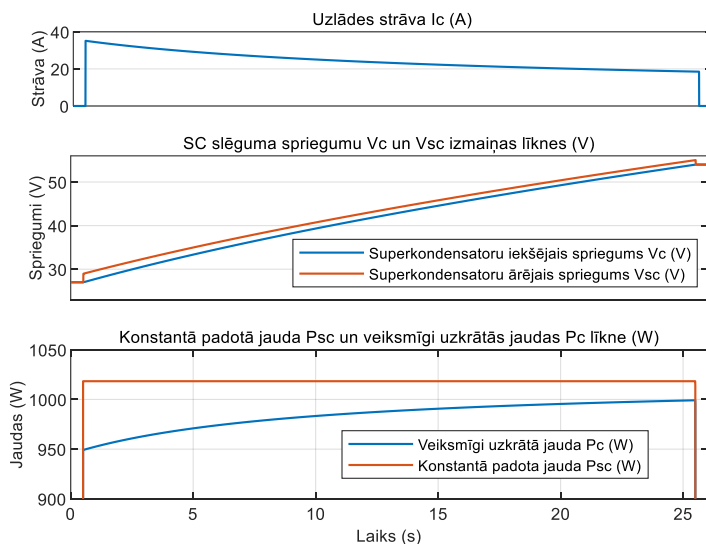
$$\begin{cases} 4RP + V_{C2}^2 \geq 0 \\ 4RP + V_{C1}^2 \geq 0 \end{cases} \quad (4.27.)$$

Atrisinot nevienādību 4.27. sistēmu, var noskaidrot, ka konstantās padotās jaudas vērtību definīcijas apgabals ir:

$$P \geq -\frac{V_{C1}^2}{4R}. \quad (4.28.)$$

Tas nozīmē, ka padotās jaudas vērtībām ar pozitīvu zīmi tīri matemātiski nav ierobežojumu, bet līdz noteiktai negatīvai padotās jaudas vērtībai ierobežojums pastāv. Tomēr uzlādes gadījumā, kā redzams, tas nav aktuāli, jo negatīva padotā jauda jau nozīmētu pretēju tās plūsmas virzienu jeb izlādi. Savukārt izlādes gadījumā, kas tiks aprakstīts turpmāk, būs aktuāli zemsakņu izteiksmju definīcijas apgabali.

Piemēra pēc 4.9. attēlā parādīti simulācijas rezultāti, uzlādējot SC slēgumu 25 sekunžu laikā ar iepriekš noteikto konstanto padoto jaudu $P = 1018,3 \text{ W}$.



4.9. att. SC slēguma uzlādes ar konstantu padoto jaudu simulācijas rezultāti.

Tā kā uzlādē visu procesa laiku t uz SC slēgumu tiek padota konstanta jauda P , tad pilnā uz SC slēgumu padotā enerģija tiek aprēķināta kā jaudas P un laika t reizinājums:

$$E_{SC} = Pt. \quad (4.29.)$$

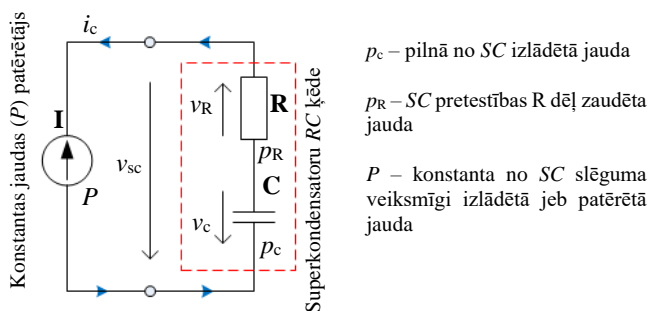
Savukārt uzkrātā enerģija E_C ir zināma jau iepriekš, jo tā tiek aprēķināta pēc tās pašas 4.5. formulas, tāpēc zaudētā enerģija E_R ir aprēķināma kā E_{SC} un E_C starpība. Savukārt uzlādes procesa pilnā efektivitāte tiek aprēķināta pēc tās pašas 4.8. formulas. Jaudas uzkrāšanas reāllaikā efektivitāte tiek aprēķināta pēc tās pašas 4.12. formulas.

Izlāde

Izlādes gadījumā tiek pieņemts, ka pie SC slēguma pieslēgts patērētājs patērē konstantu jaudu P , kā redzams 4.10. attēlā. Tas nozīmē, ka šī konstantā patērētā jauda P reāllaikā atbilst pilnās izlādētās jaudas p_C un zaudētās jaudas p_R starpībai:

$$P = p_C - p_R. \quad (4.30.)$$

Mainīgie parametri, kas uzrakstīti ar mazajiem burtiem, ir tie paši, kas bija iepriekš konstantās padotās jaudas uzlādes procesā.



4.10. att. SC slēguma izlādes ar konstantu patērēto jaudu process ekvivalentā RC ķēdē.

Izlādes gadījumam atbilstošais jaudu bilances vienādojums ir:

$$P = v_C i_C - i_C^2 R. \quad (4.31.)$$

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

$$v'_C(t) = -\frac{i_C}{C}. \quad (4.32.)$$

Izmantojot 4.32. formulu 4.31. vienādojuma pārveidošanai, iegūst diferenciālvienādojumu:

$$RC^2 v'_C(t)^2 + C v_C v'_C(t) + P = 0. \quad (4.33.)$$

Izdalot 4.33. vienādojumu ar RC^2 , iegūst:

$$v'_C(t)^2 + \frac{v_C}{RC} v'_C(t) + \frac{P}{RC^2} = 0. \quad (4.34.)$$

4.34. kvadrātvienādojuma atrisinājums ir:

$$v'_C(t) = \frac{-v_C \pm \sqrt{v_C^2 - 4PR}}{2RC}. \quad (4.35.)$$

4.35. izteiksmes pareizais atrisinājums ir ar plusa zīmi pirms kvadrātsaknes. To var izspriest, 4.35. izteiksmi salīdzinot ar 4.32. izteiksmi, jo efektivitātes paaugstināšanai izlādes strāvai vajadzētu būt pēc iespējas mazākai. Tālāk no 4.35. formulas var izvest diferenciālvienādojumu izlādes laika t aprēķināšanai:

$$dt = \frac{2RC}{-v_C + \sqrt{v_C^2 - 4PR}} dv_C. \quad (4.36.)$$

Izlādes laika t formula tiek izvesta pēc 4.36. izteiksmes integrēšanas, pieņemot, ka spriegums v_C mainās no V_{C2} līdz V_{C1} laikā t pie nosacījuma, ka $V_{C2} > V_{C1}$, rezultātā iegūstot izteiksmi [57], [58]:

$$t = \frac{C}{4P} \left(V_{C2}^2 - V_{C1}^2 + V_{C2} \cdot \sqrt{V_{C2}^2 - 4PR} - V_{C1} \cdot \sqrt{V_{C1}^2 - 4PR} - 4PR \cdot \ln \left(\frac{V_{C2} + \sqrt{V_{C2}^2 - 4PR}}{V_{C1} + \sqrt{V_{C1}^2 - 4PR}} \right) \right). \quad (4.37.)$$

Jāpiebilst, ka lai arī tiek aplūkota izlāde, aprēķinu vienkāršošanai 4.37. izteiksmē pieņemts, ka jauda P ir ar pozitīvu zīmi. Tātad 4.37. vienādojums atbild uz jautājumu: “Cik ilgā laikā t SC slēguma spriegums samazināsies no V_{C2} līdz V_{C1} , ja no tā tiks patērēta konstanta jauda P ?”. Taču nākamais interesējošais variants ir jautājums ar formulējumu: “Kāda konstanta jauda P ir jāpatērē no SC slēguma, lai tā spriegums laikā t samazinātos no V_{C2} līdz V_{C1} ?”. Līdzīgi kā iepriekš pie 4.26. vienādojuma apspriešanas, izdarāmi tādi paši secinājumi, ka no 4.37. vienādojuma nav izvedama konkrēta jaudas P aprēķināšanas formula, tāpēc jāizmanto kāds no tiem pašiem diviem iepriekš minētajiem variantiem ar skaitļošanas programmas izmantošanu vai laika t vērtību tabulas izveidošanu pie dažādām jaudām P .

Konstantas uzlādes/izlādes strāvas gadījumā pastāv sakarība, ka pēc SC slēguma uzlādes ar noteiktu strāvu laikā t no sākotnējā sprieguma V_{C1} līdz beigu spriegumam V_{C2} , šo slēgumu pēc tam ar tik pat stipru strāvu var izlādēt tādā pašā laikā t no V_{C2} līdz V_{C1} , kā redzams iepriekšējos 4.4. 4.5. attēlā. Tomēr konstantas uzlādes/izlādes jaudas gadījumā tā nav, jo izlādes procesam tikai viens no parametriem – laiks t vai jauda P – var būt vienāds ar attiecīgo uzlādes procesa parametru.

Ja tiek nolemts, ka izlādes procesam jānotiek tādā pašā laika t ilgumā, kā uzlādes procesam, tad izlādes laikā patērētā jauda P ir mazāka par konstanto padoto jaudu, kāda bija uzlādes procesā. Ja tiek nolemts, ka izlādes procesam jānotiek ar tādu pašu konstantu jaudu P , kāda bija uzlādes procesā, tad izlāde notiek ātrāk. 4.11. attēlā vienā plaknē ir attēlotas uzlādes un izlādes procesu laiku salīdzināšanas līknes atkarībā no konstantas uzlādes/izlādes jaudas, un var redzēt, ka palielinoties jaudas vērtībai un samazinoties salīdzināmās uzlādes/izlādes laikam t , atšķirība starp uzlādes un izlādes ilgumiem palielinās. Zaļā līkne 4.11. attēlā vienā punktā (3254,5 W) kļūst par sarkanu pārtrauktu līkni, un tas nozīmē, ka pie attiecīgajām jaudām P 4.37. izteiksmē zemsaknes izteiksmes, kas iekļauj V_{C2} , vērtības iznāk negatīvas. 4.11. attēlā redzamā sarkanā pārtrauktā līkne atbilst 4.37. izteiksmes rezultātu komplekso skaitļu reālajām daļām, taču kopumā tas ir nedefinēts jaudas vērtību apgabals pie konkrētajiem izlādes nosacījumiem. Ja, piemēram, izmēģinājuma pēc datormodelī iestata kādu no sarkanās līnijas izlādes jaudām un

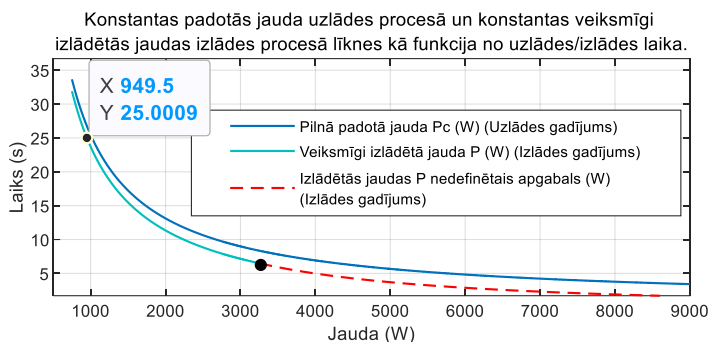
palaiž simulāciju, tad kādu laiku izlāde notiek, taču noteiktā brīdī simulācija apstājas ar uzrakstu par notikušu kļūdu. Tātad no 4.37. izteiksmes var noteikt maksimālās konstantās izlādētās jaudas derīgo vērtību intervālu, vispirms uzrakstot šādu nevienādību sistēmu:

$$\begin{cases} V_{C2}^2 - 4RP \geq 0 \\ V_{C1}^2 - 4RP \geq 0 \end{cases} \quad (4.38.)$$

Atrisīnot 4.38. nevienādību sistēmu, noskaidrojas izlādes jaudas definīcijas apgabals:

$$P \leq \frac{V_{C1}^2}{4R}. \quad (4.39.)$$

Punkts, kur beidzas zaļā līkne un sākas sarkanā pārtrauktā līkne, atbilst izteiksmes (4.39.) rezultātam gadījumā, ja tur ir vienādības zīme.



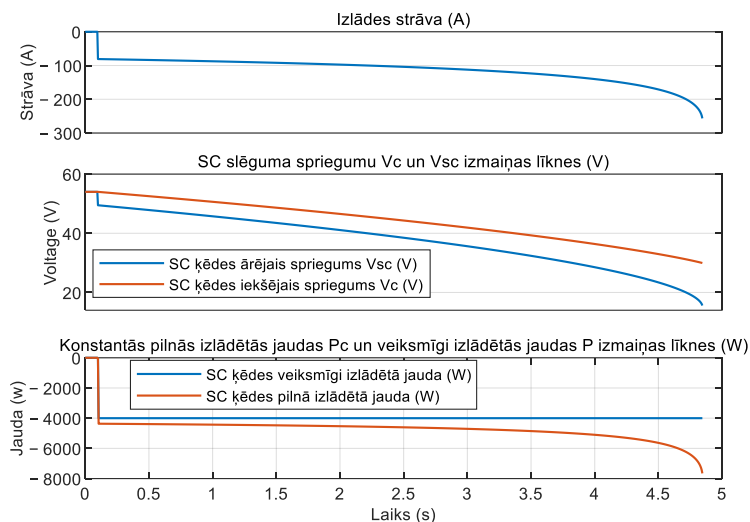
4.11. att. Uzlādes/izlādes laika diagrammas atkarībā no konstantās padotās/patērētās jaudas.

4.11. attēlā redzamā sarkanā pārtrauktā līkne, kas ir 4.37. izteiksmes komplekso rezultātu reālās daļas, izskatās kā simetrisks turpinājums zaļajai līknei, taču faktiski ar šīm sarkanās zonas jaudām izlādēt SC slēgumu līdz prasītajam 27 V spriegumam nav iespējams. Tika pamēģināts veikt SC slēguma izlādes simulāciju ar konstantu 4000 W jaudu uz 5 sekundēm, un 4.12. attēlā var redzēt, ka sākumā izlāde notiek, taču simulācija uzkaras, kad V_C ir izlādējies līdz aptuveni 30 V. Pirms simulācijas pārtraukšanās izlādes strāva un pilnā izlādētā jauda sāk strauji palielināties, bet spriegums sāk strauji samazināties, savukārt pie tik zemiem spriegumiem SC slēgums vairs nav spējīgs izlādēt tādu pilno jaudu p_c , kāda nepieciešama prasītās konstantās jeb veiksmīgi izlādētās 4000 W jaudas P nodrošināšanai, tāpēc simulācija uzkaras. Reālā situācijā jauda P vairs nebūtu konstanta, bet sāktu samazināties atbilstoši SC slēguma jaudas nodrošināšanas iespējām.

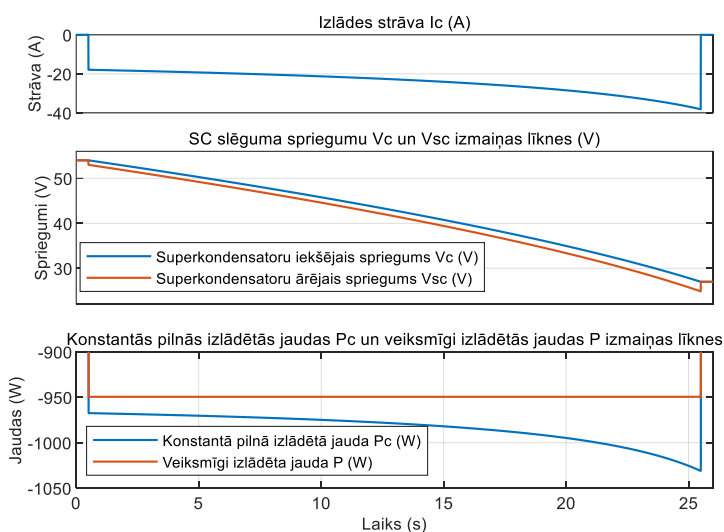
Piemēra pēc 4.13. attēlā parādīti simulācijas rezultāti, izlādējot SC slēgumu 25 sekunžu laikā no $V_{C1} = 54$ V līdz $V_{C2} = 27$ V ar konstantu jaudu $P = 949,5$ W.

Tā kā konkrētajā situācijā izlādes procesā SC slēgums iedomātu patērētāju baro ar konstantu jaudu P , ko uzskata par veiksmīgi izlādētu SC jaudu, tad attiecīgo veiksmīgi izlādēto enerģiju var aprēķināt kā patērētās jaudas P un laika t reizinājumu:

$$E_s = Pt. \quad (4.40.)$$

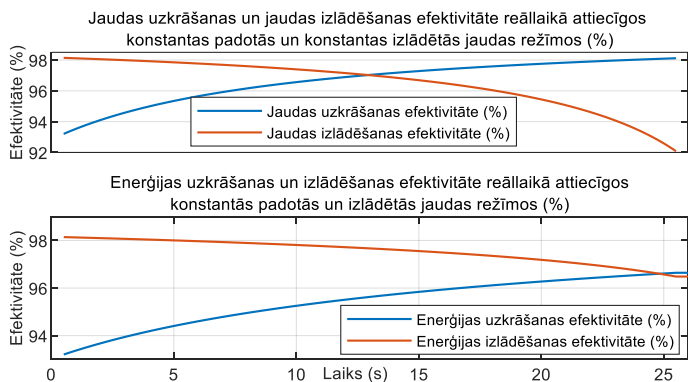


4.12. att. SC slēguma izlādes ar 4000 W konstantu patērēto jaudu simulācijas rezultāti.



4.13. att. SC slēguma izlādes ar 949,5 W konstantu patērēto jaudu simulācijas rezultāti.

Pilnā izlādētā enerģija E_C ir zināma un tiek aprēķināta pēc tās pašas 4.5. formulas, tāpēc izlādes procesa efektivitāti var aprēķināt pēc tās pašas 4.10. formulas. Pilno uzlādes/izlādes procesa efektivitāti aprēķina pēc 4.11. formulas. Jaudas izlādes efektivitāte tiek aprēķināta pēc tās pašas 4.13. formulas. 4.14. attēlā var redzēt, kā reāllaikā mainās jaudu un enerģiju uzkrāšanas/izlādēšanas efektivitātes.

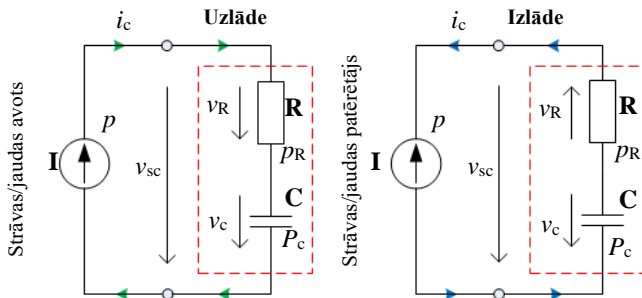


4.14. att. Jaudas un enerģijas uzkrāšanas/izlādēšanas efektivitāšu simulāciju rezultāti.

4.5. Ieskats SC ķēdes uzlādēšanā/izlādēšanā ar konstantu uzkrāto/izlādēto jaudu

Teorētiski ir iespējams arī tāds variants, kad uzlādes procesa laikā t veiksmīgi uzkrātā jauda P_C ir konstanta, kā redzams 4.15. attēlā. Ja ir zināms pilnās uzlādes procesa laikā uzkrātās enerģijas E_C apjoms, tad konstanto veiksmīgi uzkrāto jaudu P_C var aprēķināt pēc:

$$P_C = \frac{E_C}{t} = \frac{V(V_{C2}^2 - V_{C1}^2)}{2t}. \quad (4.41.)$$



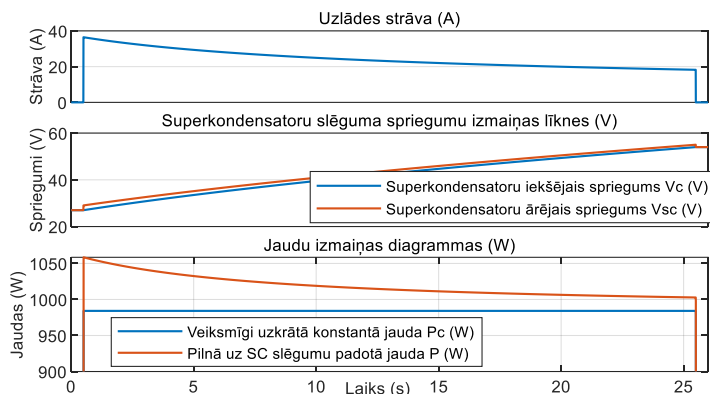
4.15. att. SC slēguma uzlādes/izlādes ar konstantu uzkrāto/patērēto jaudu RC ķēdē.

Datormodelī uzlādes procesa laikā attiecīgā uzlādes strāva reāllaikā tiek iestatīta uzlādi imitējošam strāvas avotam un tiek aprēķināta pēc formulas:

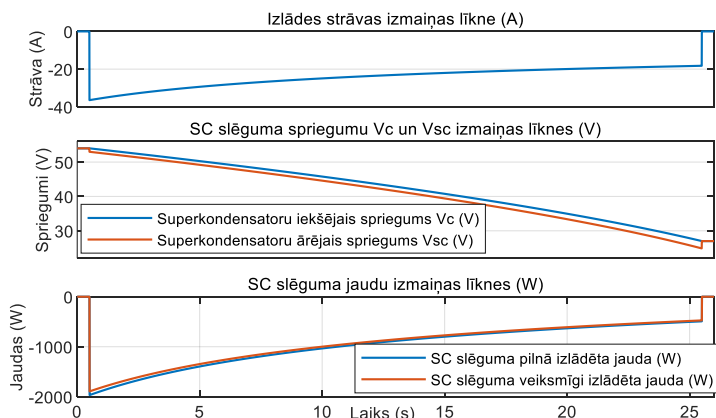
$$i = \frac{P_C}{v_{sc}}. \quad (4.42.)$$

Arī izlādes procesā izlādes strāva tiek aprēķināta pēc 4.42. formulas, tikai jauda P_C ir negatīva, lai iegūtu negatīvu, pretējā virzienā plūstošu strāvu. Saskaņā ar 4.41. formulu, konkrētais SC slēgums ir jāuzlādē ar $P_C = 984,15$ W jaudu, lai tas 25 sekunžu laikā uzlādētos no 27 V līdz 54 V, un ar tādu pašu jaudu arī jāizlādē, lai 25 sekunžu laikā tas izlādētos atkal līdz 24 V. 4.16. un 4.17. attēlos parādīti simulāciju rezultāti un var redzēt, kā uzlādes procesā

mainās padotā strāva, lai uzkrātā jauda būtu visu laiku konstanta, un izlādes procesā attiecīgi mainās izlādes strāva, lai pilnā izlādētā jauda P_C visu laiku būtu konstanta. Dotās stratēģijas kopējā uzlādes procesa efektivitāte pilnībā sakrīt ar iepriekš aprakstītās konstantās padotās jaudas stratēģijas efektivitāti pie vienādiem laikiem t , un tas pats attiecas arī uz izlādes gadījumu, norādot, ka šis variants ar konstantu uzlādēto/izlādēto jaudu efektivitātes ziņā ir pilnībā identisks iepriekš aprakstītajai stratēģijai ar konstantu padoto/patērēto jaudu. Pilnās uz SC slēgumu padotās enerģijas vērtību var aprēķināt ar 4.29. formulu, zinot vidējo uz SC slēgumu padoto jaudu. Izlādes procesā pilnās veiksmīgi izlādētās enerģijas apjomu var aprēķināt, vispirms aprēķinot vidējo veiksmīgi izlādēto jaudu ar 4.41. formulu. Tad pēc iepriekš aprakstītā algoritma var aprēķināt uzlādes/izlādes procesu zaudētās enerģijas un arī attiecīgās efektivitātes. Tomēr praksē šādu variantu ar konstantu uzlādēto/izlādēto jaudu norealizēt būtu ļoti grūti un tam arī nav konkrētu lietošanas piemēru, tāpēc turpmāk tas vairs netiks aplūkots. Savukārt pārējās – konstantas uzlādes/izlādes strāvas stratēģijas, konstantas padotās jaudas uzlādes stratēģija un konstantas patērētās jaudas izlādes stratēģija – ir viegli nerealizējamas un tiek lietotas dažādās situācijās. Visbiežāk sastopamie gadījumi ir ar patērētājiem, kas patērē konstantu jaudu.



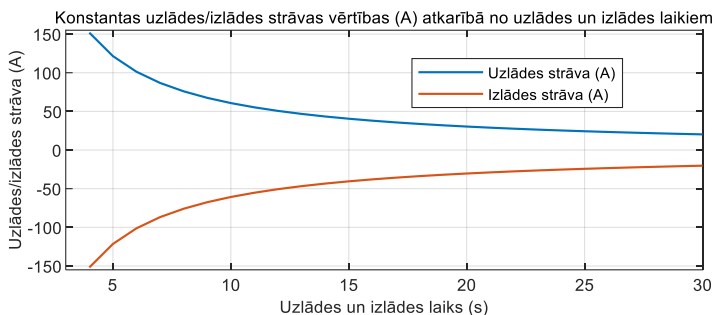
4.16. att. SC slēguma uzlādes ar konstantu veiksmīgi uzkrāto jaudu simulācijas rezultāti.



4.17. att. SC slēguma izlādes ar konstantu pilno izlādēto jaudu simulācijas rezultāti.

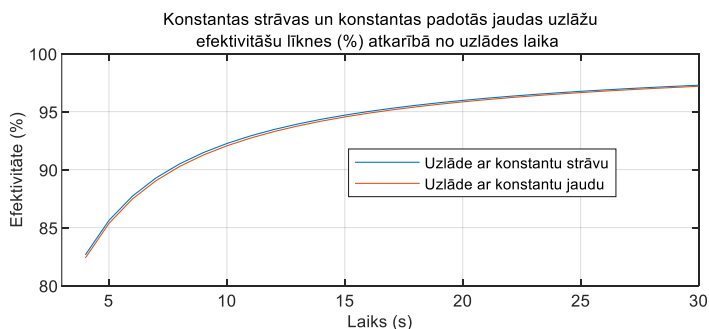
4.6. SC ķēdes konstantas strāvas un konstantas jaudas uzlādes/izlādes stratēģiju efektivitāšu savstarpējs salīdzinājums

Turpmāk tiks detalizēti salīdzinātas efektivitātes uzlādei ar konstantu strāvu un uzlādei konstantu padoto jaudu, efektivitātes izlādei ar konstantu strāvu un izlādei ar konstantu patērēto jaudu, un arī abu minēto metožu pilnās uzlādes/izlādes efektivitātes. Attiecīgie aprēķini tiks veikti tam pašam SC slēgumam pie tiem pašiem līdzšinējiem nosacījumiem, pieņemot, ka tas tiek uzlādēts no 27 V līdz 54 V un pēc tam tik pat ilgu laiku tiek izlādēts atpakaļ līdz 27 V spriegumam, kāds bija uzlādes sākumā. Saskaņā ar ražotāja sniegto informāciju attiecīgā SC elementa rekomendētā maksimālā īslaicīgā pīķa strāva ir 240 A. Tāpēc netiks aplūkoti gadījumi ar 1 s; 2 s un 3 s uzlādi/izlādi, lai efektivitātes paaugstināšanai konstantā uzlādes/izlādes strāva būtu zem 200 A, jo saskaņā ar 4.4. formulu konstantā uzlādes/izlādes strāva pie šiem ilgumiem ir virs 200 A. Tiks aplūktas 4 s līdz 30 s ilgas uzlādes un tik pat ilgas attiecīgas izlādes ar izmaiņas soli 1 s. 4.18. attēlā parādītas uzlādes/izlādes strāvu vērtību līkne, aprēķināta ar 4.4. formulu, kā funkcija no uzlādes/izlādes laika.

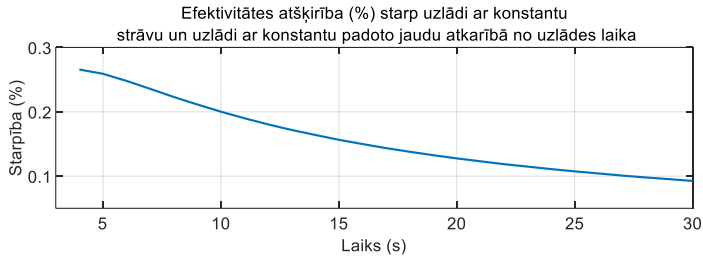


4.18. att. Uzlādes/izlādes strāvas vērtības atkarībā no uzlādes/izlādes laika.

Lai arī ne pārāk izteikti, tomēr 4.19. attēlā rezultāti uzrāda, ka uzlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi ar konstantu padoto jaudu, un 4.20. attēlā parādītas procentuālās atšķirības, kas ir aptuveni no 0,1 % līdz 0,25 %. Pie ātrākām uzlādēm šī procentuālā atšķirība ir lielāka, pie ilgākām uzlādēm – mazāka.

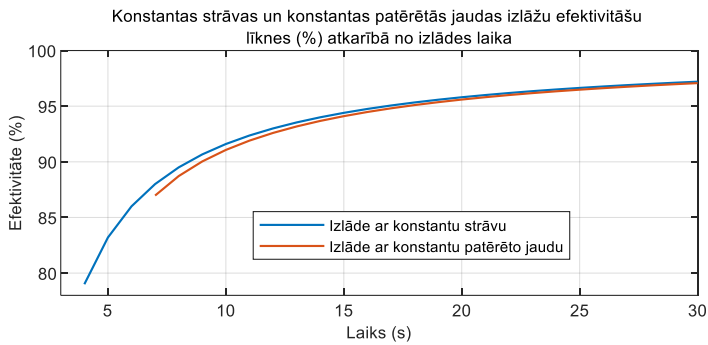


4.19. att. SC slēguma jaudas uzlādes efektivitātes diagrammas atkarībā no uzlādes laika.

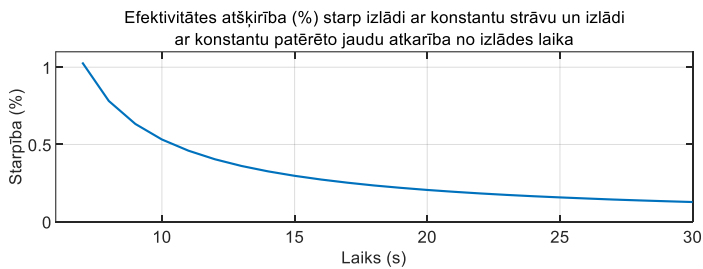


4.20. att. Atšķirība starp SC slēguma jaudas uzlādes efektivitātēm konstantas uzlādes strāvas un konstantas padotās jaudas gadījumos.

Konstantas patērētās jaudas izlādes sākotnējais laiks ir 7 s, jo 4.37. formulā zemsaknes izteiksmes ar V_{C2} iznāk negatīvas, tāpēc uzlādes laikiem, kas mazāki par 7 s, nepastāv derīgu patērēto jaudu vērtības, kā aprakstīts iepriekš, atsaucoties uz 4.10. attēlu. Kā redzams 4.21. un 4.22. attēlā, izlādes gadījumā izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka salīdzinājumā ar uzlādes gadījumu no 4.19. un 4.20. attēla.



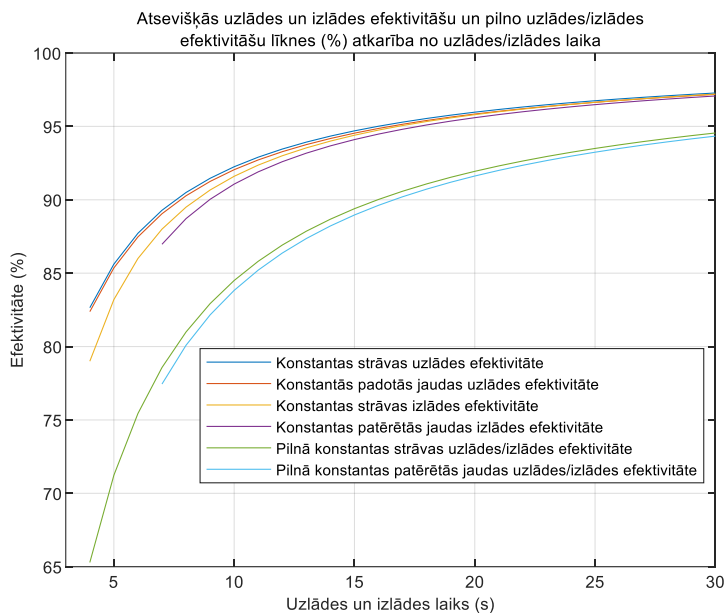
4.21. att. SC slēguma jaudas izlādes efektivitātes diagrammas atkarībā no izlādes laika.



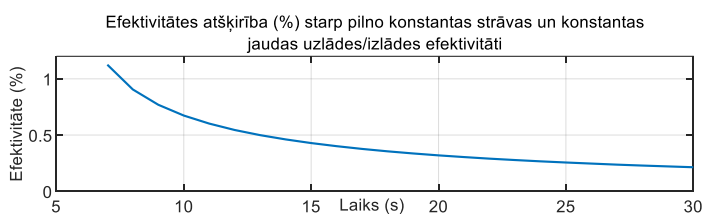
4.22. att. Atšķirība starp SC slēguma jaudas izlādes efektivitātēm konstantas izlādes strāvas un konstantas patērētās jaudas gadījumos.

4.23. attēlā redzams, kā pilnās konstantās strāvas uzlādes/izlādes efektivitāte ir augstāka par konstantās padotās/patērētās jaudas uzlādes/izlādes efektivitāti. 4.24. attēlā redzamas precīzas skaitliskās procentuālās atšķirības. Pie ātrākām uzlādēm šī atšķirība ir augstāka, un pie ilgākām uzlādēm tā pakāpeniski samazinās.

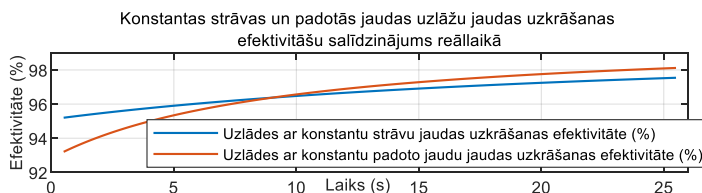
Aprakstītās konstantas strāvas un konstantas padotās jaudas uzlādes efektivitātes atsevišķās uzlādes laika daļās atšķiras. Piemēram, 4.25. attēlā parādīts jaudas uzkrāšanas efektivitāšu salīdzinājums pie iepriekš simulētajām uzlādēm SC slēgumam no 27 V līdz 54 V 25 sekunžu laikā. Var redzēt, ka uzlādes sākumā konstantas uzlādes strāvas variantā efektivitāte ir augstāka, taču konstantas padotās jaudas varianta efektivitāte pieaug straujāk līdz noteiktā brīdī pārsniedz konstantas uzlādes strāvas varianta efektivitāti.



4.23. att. SC slēguma uzlādes/izlādes efektivitāšu salīdzinājums konstantas strāvas un jaudas izlādes/uzlādes variantiem.

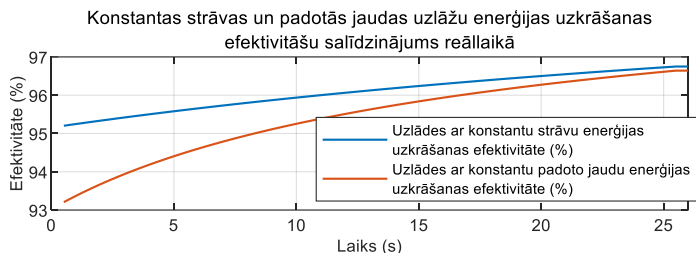


4.24. att. Atšķirība starp konstantas strāvas un konstantas jaudas uzlādes/izlādes efektivitātēm.



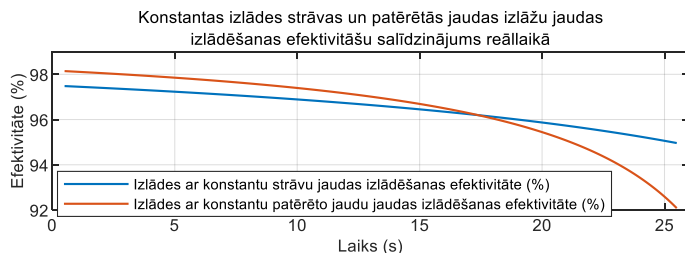
4.25. att. Jaudas reāllaika uzkrāšanas efektivitāšu salīdzināšanas diagrammas.

Skatoties uz 4.26. attēlu, var redzēt, ka uzlādes ar konstantu strāvu enerģijas uzkrāšanas efektivitāte ir augstāka visu uzlādes laiku. Lai arī uzlādes ar konstantu padoto jaudu enerģijas uzkrāšanas efektivitāte palielinās diezgan strauji un uzlādes beigās ir gandrīz pietuvojusies konstantas uzlādes strāvas varianta efektivitātei, tomēr pilnā uzlādes procesa efektivitāte, kas ir redzama diagrammas pēdējā punktā, saglabājas augstāka konstantas uzlādes strāvas variantam.



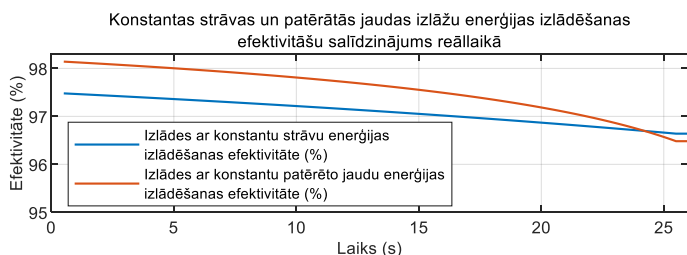
4.26. att. Enerģijas reāllaika uzkrāšanas efektivitāšu salīdzināšanas diagrammas.

4.27. attēlā parādīts jaudas izlādēšanas efektivitāšu salīdzinājums, veicot izlādi atpakaļ līdz 27V 25 sekunžu laikā. Redzams, ka izlādes sākumā konstantas patērētās jaudas izlādes varianta efektivitāte ir augstāka nekā konstantas izlādes strāvas variantam, tomēr ar laiku šī efektivitāte samazinās straujāk, līdz nokrītās zem konstantas izlādes strāvas varianta efektivitātes.



4.27. att. Jaudas reāllaika izlādēšanas efektivitāšu salīdzināšanas diagrammas.

Arī skatoties uz 4.28. attēlu, var redzēt, ka izlādes procesa sākumā konstantas patērētās jaudas izlādes variantam efektivitāte ir augstāka, taču izlādes procesa beigās konstantas izlādes strāvas varianta pilnā efektivitāte ir augstāka, neskatoties uz to, ka lielāko izlādes laika daļu izlādes ar konstantu patērēto jaudu efektivitāte bija augstāka.

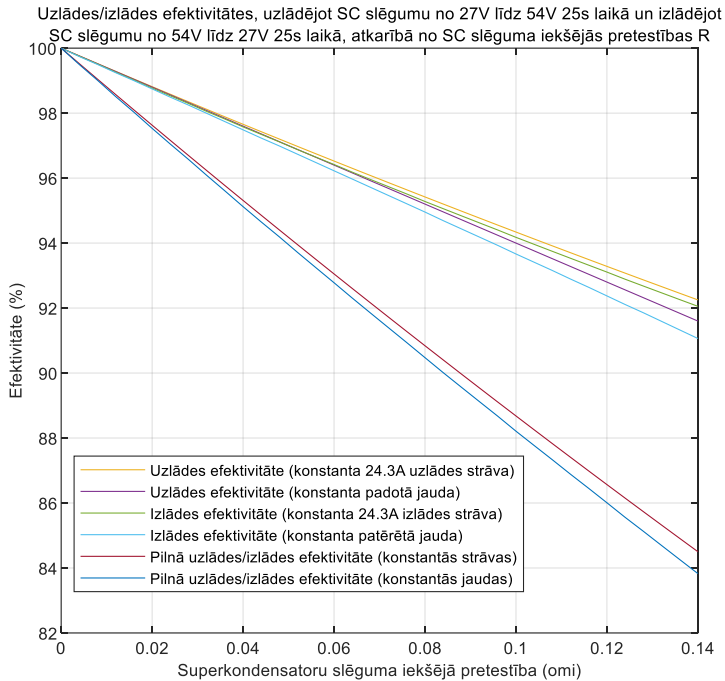


4.28. att. Enerģijas reāllaika izlādēšanas efektivitāšu salīdzināšanas diagrammas.

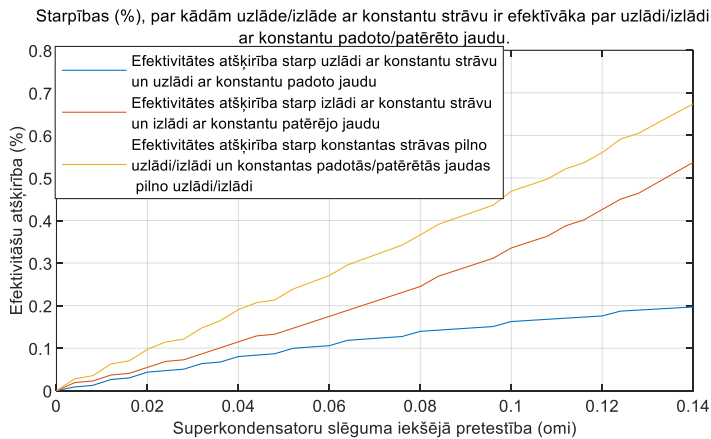
Noskaidrojot to, ka uzlādes gadījumā SC slēguma uzlādēšana ar konstantu strāvu izrādās efektīvāka par uzlādēšanu ar konstantu padoto jaudu, un to, ka arī izlādes gadījumā SC slēguma izlādēšana ar konstantu strāvu izrādās efektīvāka par izlādēšanu ar konstantu patērēto jaudu, tika nolemts pārbaudīt, kā šī atšķirība izmainās atkarībā no SC slēguma iekšējās pretestības R . Līdz šim veiktajos aprēķinos un simulācijās SC slēguma iekšējā pretestība bija $0,056 \Omega$, kas atbilda attiecīgam 20 šūnu virknes slēgumam, vadoties pēc ražotāja sniegtās informācijas un neņemot vērā SC ķēdes plates celiņu pretestību, taču tagad tiks veikts efektivitāšu atšķirību salīdzinājums SC slēgumu ar kapacitāti $C = 22,5 \text{ F}$ uzlādējot no 27 V līdz 54 V 25 sekunžu laikā pie dažādām iekšējām pretestībām R , kas mainās no 0Ω līdz $0,14 \Omega$ ar izmaiņas soli $0,004 \Omega$. Konstantas uzlādes/izlādes strāvas gadījumā attiecīgā strāva ir tie paši $24,3 \text{ A}$ pie visām pretestībām R no iepriekš minēta intervāla. Savukārt konstantas padotās jaudas variantā pie katras R attiecīgā jauda tiek aprēķināta atsevišķi ar 4.26. formulu un rezultāti ir no $948,15 \text{ W}$ līdz $1069,1 \text{ W}$, un konstantas patērētās jaudas variantā pie katras R attiecīgā jauda tiek aprēķināta atsevišķi ar 4.37. formulu un rezultāti ir no $948,15 \text{ W}$ līdz $896,2 \text{ W}$. Saskaņā ar turpmāko aprēķinu rezultātiem gan uzlāde, gan izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka jebkurā gadījumā, izņemot gadījumā, kad pieņem, ka iekšējās pretestības nav, t.i. $R = 0 \Omega$, jo šī situācijā abām stratēģijām ir vienādas 100 % efektivitātes gan pie uzlādes, gan pie izlādes. Taču praksē šāds gadījums ar nulles iekšējo pretestību nav iespējams, jo kaut kāda neliela iekšējā pretestība būs jebkuram kondensatoram.

4.29. attēlā redzams, ka pie mazākām iekšējām pretestībām atšķirība starp uzlādēšanu ar konstantu strāvu un konstantu padoto jaudu ir mazāka, savukārt pie lielākām iekšējām pretestībām šī atšķirība pakāpeniski pieaug, un tādu pašu secinājumu var izdarīt arī par izlādēšanu. Turklāt izlādēšanas gadījumā minētās atšķirības ir izteiktākas nekā uzlādes gadījumā, skatoties uz 4.29. attēlu. Savukārt 4.30. attēlā parādītas šo atšķirību precīzas skaitliskās vērtības, bet vismanāmāk atšķirības var redzēt, salīdzinot pilnās uzlādes/izlādes procesu efektivitātes.

Skatoties uz 4.30. attēlā redzamajām skaitliskajām efektivitāšu atšķirībām, var secināt, ka uzlāde un izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi ar konstantu padoto jaudu un izlādi ar konstantu patērēto jaudu, bet nebūtiski, jo šīs atšķirības ir krietni zem 1 %. Līdz ar to no praktiskā viedokļa abas no šīm uzlādes/izlādes metodēm efektivitātes ziņā var uzskatīt par līdzvērtīgām. Tomēr veiktajiem aprēķiniem un iegūtajiem rezultātiem ir fundamentāla teorētiska vērtība, jo tie pierāda un pamato, ka efektivitātes ziņā gan matemātiski, gan fizikāli kondensatora uzlāde ar konstantu strāvu nav pilnīgi identiska uzlādei ar konstantu padoto jaudu, tāpat kā izlāde ar konstantu strāvu nav pilnīgi identiska izlādei ar konstantu patērēto jaudu.



4.29. att. Uzlādes/izlādes metožu efektivitāšu salīdzināšanas diagrammas atkarībā no SC slēguma iekšējās pretestības.



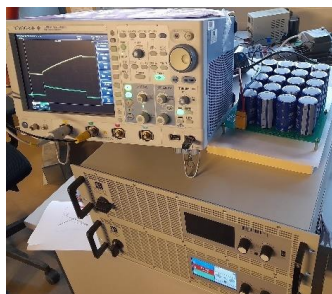
4.30. att. Atšķirības, par kādām konstantas strāvas uzlādes/izlādes ir efektīvākas par konstantas padotās/patērētās jaudas uzlādēm/izlādēm.

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

Līdzās simulācijām un aprēķiniem, kas balstās SC slēgumam ekvivalentā RC ķēdes modeli, tika nolemts veikt arī reāla SC slēguma uzlādi ar konstantu strāvu un tai sekojošu izlādi ar

konstantu strāvu, kā arī uzlādi ar konstantu padoto jaudu un tai sekojošo izlādi ar konstantu patērēto jaudu, lai pārbaudītu, vai iepriekš aprakstītais aprēķinos un simulācijās balstītais teorētiskais pamatojums par to, ka kondensatoru uzlāde/izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi/izlādi ar konstantu padoto/patērēto jaudu, ir tikpat viegli pārbaudāms arī praktiski, ņemot vērā to, ka šī atklātā atšķirība ir pavisam neliela, vairumā gadījumu būdama zem 1 %.

Iepriekš 4.1. attēlā aplūkotais 20 šūnu *SC* virknes slēgums tiks uzlādēts, izmantojot barošanas avotu, kas var padot gan konstantu strāvu, gan arī konstantu jaudu, un izlādēts, izmantojot elektronisku slodzi, kas var patērēt gan konstantu jaudu, gan konstantu strāvu. Sakarā ar to, ka pieejamās elektroniskās slodzes maksimālā darba strāva ir 30 A, uzlādes/izlādes nosacījumi atšķirsies no iepriekšējiem. Slēguma sākotnējais minimālais spriegums būs $V_{C1} = 27$ V un beigu maksimālais spriegums būs $V_{C2} = 50$ V, savukārt uzlādes un izlādes laiki katrs ilgs 30 sekundes. Eksperimentālie mērījumi tiks salīdzināti ar simulāciju rezultātiem, un 20 *SC* šūnu virknes slēguma mērījumu veikšanas stends parādīts 4.31. attēlā. *SC* uzlādes režīmā tika izmantots līdzstrāvas jaudas avots EA-PSI 9550-60, bet *SC* izlādes režīmā kā patērētājs tika izmantota ELR 91500-30 elektroniskā slodze. Eksperimentālās strāvu un spriegumu līknes tika uzņemtas ar mērierīcēm osciloskopu DLM6054 un strāvas sensoru TA018.

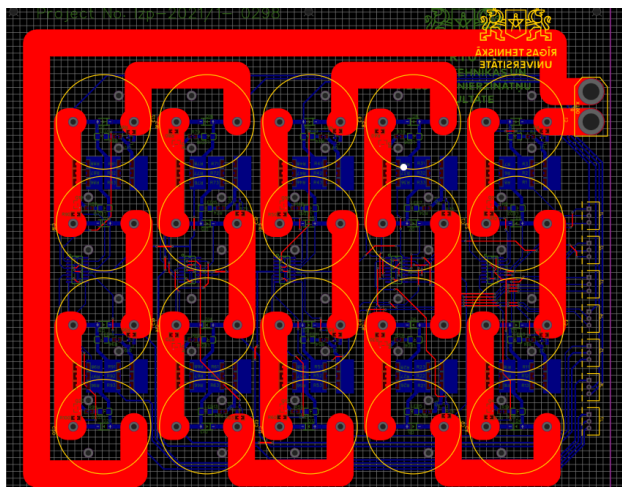


4.31. att. *SC* uzlādēšanas/izlādēšanas testēšanas stends un iekārtas.

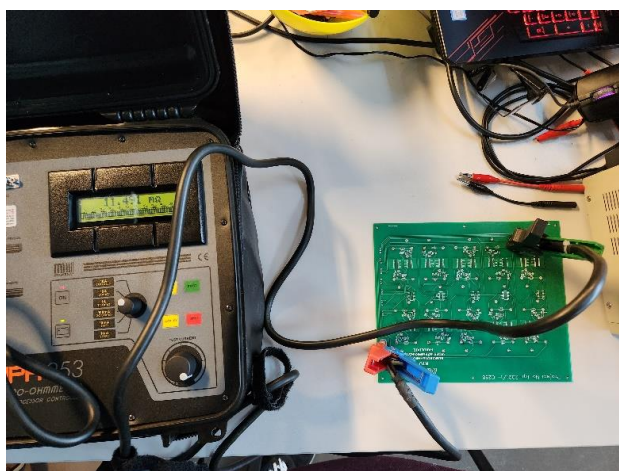
Veicot aprēķinus un simulācijas pēc iepriekš aprakstītajām metodēm ar *RC* ķēdi, parametra *R* noteikšanā tomēr nevar paļauties tikai uz *SC* slēguma pilno iekšējo pretestību, jo diezgan ievērojama pretestība var būt arī, piemēram, slēguma plates vadošajiem celiņiem, un ar mikroommetra palīdzību tika noskaidrots, ka šo celiņu kopēja pretestība ir aptuveni 46 mΩ. Plates vadošie celiņi parādīti 4.32. attēlā sarkanā krāsā, vadošo celiņu pretestības mērīšana ar mikroommetru parādīta 4.33. attēlā.

Savukārt vadu, kas *SC* slēgumu savieno ar barošanas avotu uzlādes gadījumā un elektronisko slodzi izlādes gadījumā, pretestība ir 6,3 mΩ. Abas no minētajām pretestībām jāpieskaita klāt *SC* slēguma 56 mΩ iekšējai pretestībai, līdz ar to pilnās pretestības *R* vērtība, kas turpmāk tiks izmantota ekvivalentajā *RC* ķēdē aprēķinu veikšanai, būs $R = 108,3$ mΩ. Konstantās uzlādes/izlādes strāvas I_C aprēķinu šī pretestība neietekmē, jo šī strāva ir aprēķināma ar 4.4. formulu, saskaņā ar kuru $I_C = 17,25$ A. Pie uzlādes ar konstantu padoto jaudu, 4.21. izteiksmē izmantojot jauno *R* un iegūstot attiecīgu līkni kā 4.8. un 4.11. attēlā, no kuras atrod attiecīgo jaudu pie 30 s, nepieciešamā konstantā padotā jauda ir 697,1 W. Attiecīgi

pie izlādes ar konstantu patērēto jaudu, 4.32. izteiksmē izmantojot jauno R un atrodot attiecīgo jaudu pie 30 s, nepieciešamā konstantā patērēta jauda ir 630,6 W.

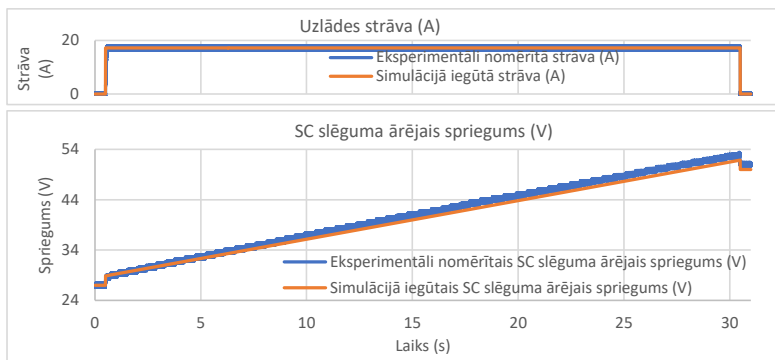


4.32. att. SC slēguma plates vadošie celiņi.

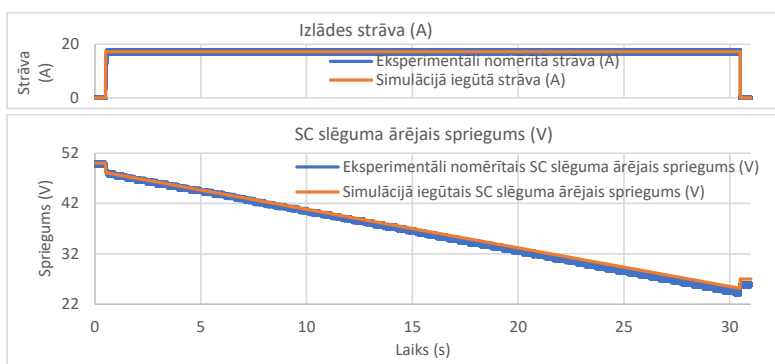


4.33. att. SC slēguma plates vadošo celiņu pretestības mērīšana.

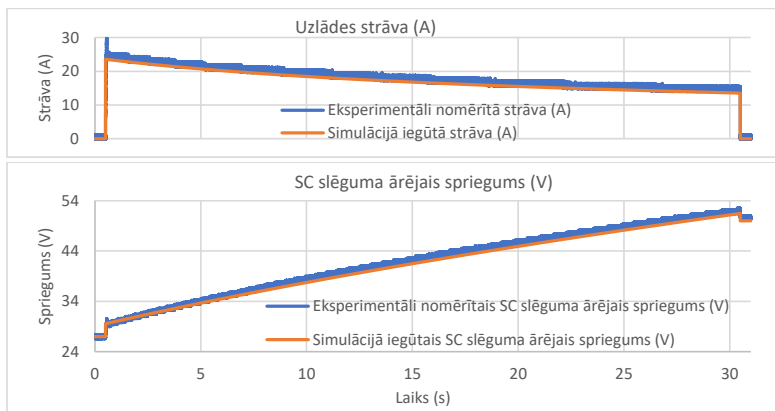
4.34., 4.35., 4.36. un 4.37. attēlā parādīti eksperimentālo mērījumu rezultāti kopā ar simulāciju rezultātiem vienā plaknē, turklāt var redzēt, ka pie mērīšanas ar osciloskopu pastāv signālu svārstības, kuru dēļ līknes neiznāk tik gludas kā simulācijās.



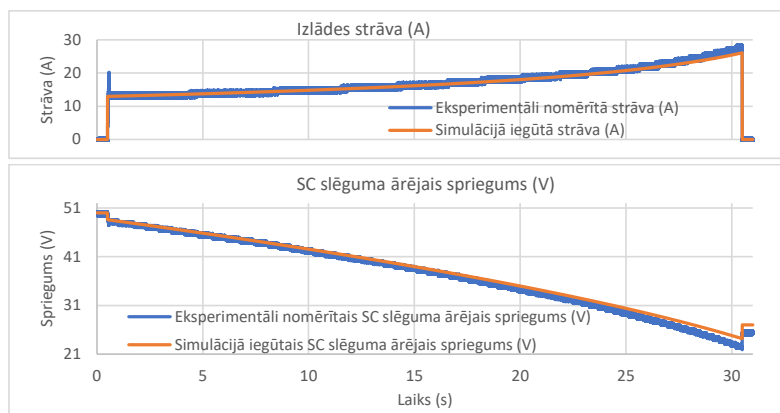
4.34. att. SC slēguma uzlādes ar konstantu strāvu mērījumu un simulāciju diagrammas.



4.35. att. SC slēguma izlādes ar konstantu strāvu mērījumu un simulāciju diagrammas.



4.36. att. SC slēguma uzlādes ar konstantu padoto jaudu mērījumu un simulāciju diagrammas.



4.37. att. SC slēguma izlādes ar konstantu patērēto jaudu mērījumu un simulāciju diagrammas.

Eksperimentālie rezultāti rāda, ka gan konstantas strāvas, gan konstantas jaudas gadījumā izlāde notiek nedaudz ātrāk, jo pēc 30 sekundēm SC ķēdes beigu spriegums ir nedaudz zemāks par plānotajiem 27 V, taču šīs atšķirības ir ļoti maznozīmīgas. Līdzīgu secinājumu var izdarīt attiecībā uz eksperimentālajām uzlādēm, kur pēc 30 sekundēm SC ķēdes beigu spriegums ir nedaudz augstāks par plānotajiem 50 V. Tomēr iepriekš minētie apgalvojumi balstās vizuāli redzamajās atšķirībās starp gaidītajiem jeb simulāciju rezultātiem un faktiskajiem eksperimentāli izmērītajiem rezultātiem. Lai iegūtu precīzākas skaitliskās atšķirības starp plānotajiem precīzajiem rezultātiem un faktiskajiem eksperimentālajiem rezultātiem, var izmantot vidējās kvadrātiskās kļūdas metodi 30 sekunžu periodā, kas 4.34., 4.35., 4.36. un 4.37. attēlā tiek rēķināta posmam no 0,5 s līdz 30,5 s. Gan SC strāvai, gan SC ārējam spriegumam var aprēķināt vidējo kvadrātisko nobīdi ar formulu:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (4.42.)$$

kur x_i - plānotais mērījuma rezultāts;

y_i ir faktiskais mērījuma rezultāts;

$n = 75\,000$ ir atsevišķo mērījumu skaits 30 sekunžu laikā.

SC strāvas un spriegumu vidējo kvadrātisko nobīžu aprēķina rezultāti parādīti tabulā 4.1.

4.1. tabula

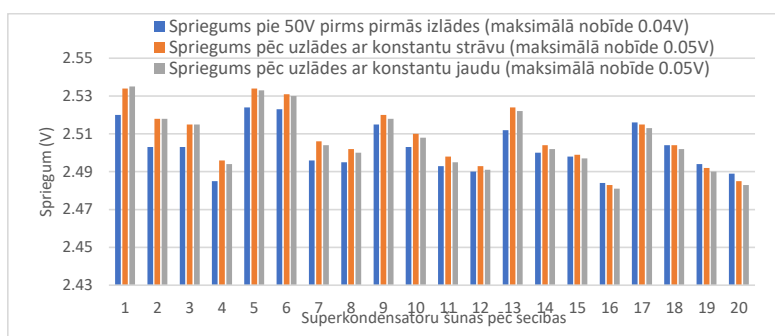
SC strāvas un ārējā sprieguma vidējās kvadrātiskās nobīdes RMSE.

Mērījums	Konstantas strāvas izlāde	Konstantas strāvas uzlāde	Konstantas jaudas izlāde	Konstantas jaudas uzlāde
SC strāvas RMSE (A)	0,58	1,28	0,72	1,18
SC ārējā sprieguma RMSE (V)	0,62	0,91	0,8	0,72

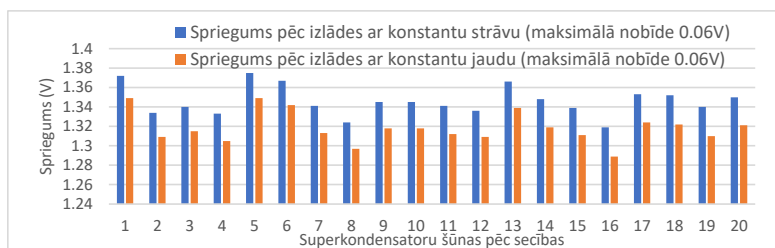
Jo vidējās kvadrātiskās nobīdes RMSE mazākas un tuvākas nullei, jo precīzāk eksperimentālie rezultāti atbilst gaidītajiem (simulāciju) rezultātiem, taču nelielas skaitliskas nobīdes tomēr pastāv, kā redzams tabulā 4.1. Katrā no gadījumiem kā vienu no neprecizitāšu

iemesliem var minēt vienkāršotā RC modeļa izmantošanu teorētiskajos aprēķinos un simulācijās. Kā otru iemeslu var minēt to, ka precīzā SC slēguma kapacitāte var atšķirties no aprēķinātās sakarā ar to, ka pie SC izmantošanas to kapacitāte ar laiku samazinās. Kapacitātes samazināšanās var atstāt ietekmi gan konstantas strāvas, gan konstantas jaudas uzlādei/izlādei, jo kapacitāte tiek izmantota, lai aprēķinātu attiecīgo uzlādes izlādes strāvu un uzlādes/izlādes jaudu. Kā trešo iemeslu var minēt SC iekšējās pretestības atšķirību no aprēķinātās, jo pie SC izmantošanas to iekšējā pretestība ar laiku palielinās.

Turklāt SC slēguma atsevišķu SC iepriekš minētie parametri – kapacitāte un iekšējā pretestība – laika gaitā var būt arī nevienmērīgi izmainījušies, jo sprieguma balansēšanas ķēdes ne vienmēr ir tik ideālas, lai nodrošinātu pilnīgi vienādus spriegumus uz katra no slēguma kondensatoriem. Tāpēc gan pirms, gan pēc uzlādēm/izlādēm ar voltmetru tika izmērīti spriegumi arī uz katra atsevišķa kondensatora, lai pārlicinātos, cik vienmērīgi slēguma pilnais spriegums sadalīts pa atsevišķajām SC šūnām, un atklājās arī zināmas nobīdes. Kā redzams 4.38. un 4.39. attēlā, spriegumu nobīdēs pastāv tāda kā simetrija ik pa četriem secīgiem SC balansēšanas plates dēļ. Dažādām balansēšanas platēm var būt atšķirīgas īpatnības. Konkrētajā situācijā maksimālās atšķirības starp divām atsevišķām SC šūnām ir no 0,04 V līdz 0,06 V.



4.38. att. SC slēguma katras šūnas spriegumu vērtības pirms pirmās izlādes un pēc uzlādēm.



4.39. att. SC slēguma katras šūnas sprieguma vērtības pēc izlādēm.

Izmantojot vidējās kvadrātiskās nobīdes metodi, tika aprēķināta katras atsevišķas SC šūnas sprieguma vidējā kļūdas vērtība visiem 4.38. un 4.39. attēla gadījumiem, pieņemot, ka visas SC ķēdes spriegums ir atsevišķo SC šūnu izmērīto spriegumu summa, bet vienas SC šūnas spriegumam vajadzētu būt pilnā SC ķēdes sprieguma un SC šūnu skaita daļījumam. Tabulā 4.2 parādīti rezultāti un var redzēt, ka spriegumu nobīdes kopumā nav augstas.

SC šūnu spriegumu vidējās kvadrātiskās nobīdes RMSE.

Gadījums	RMSE vērtība (V)
RMSE pirms pirmās izlādes	0,012
RMSE pēc konstantas strāvas izlādes	0,015
RMSE pēc konstantas strāvas uzlādes	0,015
RMSE pēc konstantas jaudas izlādes	0,015
RMSE pēc konstantas jaudas uzlādes	0,016

Salīdzinot eksperimentālos rezultātus ar simulāciju rezultātiem, ir secināms, ka konstantas strāvas un konstantas jaudas uzlādes/izlādes metodes ir praktiski līdzīgas attiecībā uz *SC* ķēdes uzlādi/izlādi kādā noteiktā plānotā laikā, taču tik un tā pastāv zināmas neprecizitātes iepriekš minēto iemeslu dēļ, kas iekļauj, piemēram, zināmu neprecizitāti, kas piemīt vienkāršotajam *RC* modelim, *SC* šūnu kapacitāšu *C* un pretestību *R* nevienmērīgu izmaiņu laika gaitā, utt. Līdz ar to šādi praktiski eksperimenti ļauj iegūt rezultātus, kuri ir aptuveni, bet ne precīzi vienādi ar plānotajiem jeb simulāciju rezultātiem. Tāpēc eksperimentālā veidā apstiprināt iepriekš iegūto atziņu par to, ka konstantas strāvas uzlāde/izlāde ir efektīvāka par konstantas jaudas uzlādi/izlādi, ir ļoti grūti jeb praktiski neiespējami, it īpaši, ja šī atšķirība ir mazāka par 1 %.

4.8. Secinājumi

Veicot detalizētus aprēķinus un salīdzinājumus, atklājās, ka jebkurā situācijā *SC* uzlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par uzlādi ar konstantu padoto jaudu, un līdzīgi jebkurā situācijā izlāde ar konstantu strāvu ir efektīvāka par izlādi ar konstantu jaudu, ja par pamatu tiek izmantots *RC* ķēdes modelis. Tomēr šīs efektivitāšu atšķirības, kas mainās atkarībā no *SC* iekšējās pretestības, darbā aplūkotajos gadījumos ir mazākas par 1 %, līdz ar to no praktiskā viedokļa abas metodes ir uzskatāmas par līdzvērtīgām. Tāpēc galvenā pētījuma novitāte ir fundamentāls pamatojums tam, ka *RC* ķēdē konstantas strāvas uzlāde/izlāde ir efektīvāka par konstantas jaudas uzlādi/izlādi. Turklāt šī atziņa ir patiesa jebkurai *SC* šūnai jeb šūnu slēgumam ar noteiktu kapacitāti *C* un iekšējo pretestību *R* – gan darbā aplūkotajam *SC* slēgumam, gan arī liela izmēra elektrotransporta mobilām un stacionārām *SC* EUS. Dažādām *SC* šūnām ar savām *C* un *R* var atšķirties atšķirība, par kādu konstantas strāvas uzlāde/izlāde ir efektīvāka, un šīs atšķirības var aprēķināt ar promocijas darba gaitā izvestajiem vienādojumiem jebkurai, tajā skaitā elektriskā transporta, piemēram, trolejbusa *SC* EUS.

Tā kā minētās efektivitāšu atšķirības starp abām metodēm ir mazākas par 1 %, tad ir ļoti grūti un praktiski neiespējami to apstiprināt eksperimentāli sakarā ar to, ka vienkāršotais *RC* modelis ir zināmā mērā neprecīzāks salīdzinājumā ar reālu *SC*, kapacitāte un iekšējā pretestība *SC* slēguma atsevišķām šūnām var būt izmainījusies nevienmērīgi, un spriegumu balansēšanas ķēde var nenodrošināt pilnīgi vienādus spriegumus uz visām *SC* slēguma šūnām.

Tomēr atklājums, ka konstantas strāvas uzlāde ir efektīvāka par konstantas jaudas uzlādi ir nozīmīgāks no praktiskā viedokļa, jo šādas vienkāršas *SC* uzlādes ar konstantu strāvu vai konstantu jaudu, piemēram, elektriskā transporta EUS gadījumos notiek biežāk, nekā izlādes ar konstantu strāvu/jaudu. Līdz ar to var uzskatīt, ka izmantojot konstantas strāvas metodi liela mēroga *SC* EUS uzlādes gadījumiem ilgtermiņā, enerģijas ietaupījumi varētu būt manāmāki.

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 rekuuperējošās piedziņas bremsēšanas režīma laikā rekuuperē 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 rekuuperētās enerģijas uzkrāšanai un izmantošanai, tomēr šādas *EUS* sākotnējai energoietilpībai jābūt par noteiktu rezerves apjomu augstākai par uzkrājamo rekuuperēto 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.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Global EV Outlook 2017 – Two million and counting
- [2] J. Birzga: Eiropas ekonomikas zonas finanšu instrumenta 2009.–2014. gada perioda programmas "Nacionālā klimata politika" neliela apjoma grantu shēmas projekta "Klimata izglītība visiem" pētījums – Parīzes samits un tajā nolemtais, Rīga 2016
- [3] Pieejams: <http://www.europarl.europa.eu/news/lv/headlines/society/20190313STO31218/automasinu-raditas-co2-emisijas-skaitli-un-fakti-infografika>
- [4] Pieejams: <https://www.consilium.europa.eu/lv/infographics/greenhouse-gas-emissions/>
- [5] R. Albina, "Методические положения повышения качества услуг городского общественного транспорта", disertācija, Samara 2014
- [6] Possibilities of energy demand reduction in trolleybus transportation, Faculty of Electrical Engineering and Communication Brno University of Technology, Department of Power Electrical and Electronic Engineering, Brno 2014
- [7] Š. Hamacek, M. Bartłomiejczyk, R. Hrbac, S. Misak, V. Styskala, "Energy recovery effectiveness in trolleybus transport", *Electric Power Systems Research* 112 (2014) 1-11
- [8] E. M. Shabanova, V. V. Biryukov, E. A. Ryzhova, "Analysis of Existing Technical Solutions for Electric Energy Recovery on Urban Transport", 14th International Scientific-Technical Conference, 2018
- [9] V. Gelman, "Energy Storage That May Be Too Good to Be True: Comparison Between Wayside Storage and Reversible Thyristor Controlled Rectifiers for Heavy Rail", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, December 2013
- [10] B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, M. Klohr, "Study and Simulation of the Energy Balance of an Urban Transportation Network", *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007
- [11] E. Lefter, B. A. Enache, I. B. Maria, C. Goia, "Hybridization of trolleybuses – means for increasing the transports flexibility and reduction of the pollution", *UPB 2015 Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*. 77. 293 – 304.
- [12] 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
- [13] L. Hubka, P. Školník, "Tram Simulation Model for Energy Balance Analyses", 21st International Conference on Process Control (PC) 2017, Slovakia
- [14] 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
- [15] M. Bartłomiejczyk, "Super capacitor energy bank MEDCOM UCER-01 in Gdynia trolleybus system", 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016
- [16] M. Bartłomiejczyk, "Practical application of in motion charging: Trolleybuses service on bus lines", 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2017

- [17] M. Bartłomiejczyk, "Modern technologies in energy demand reducing of public transport – practical applications", 2017
- [18] 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
- [19] L. Streit, P. Drabek, "Simulation Model of Tram with Energy Storage System", 2013
- [20] L. Latkovskis, V. Brazis, "Simulation of the Regenerative Energy Storage with Supercapacitors in Tatra T3A Type Trams", 2008
- [21] 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. Sciyo: InTech, 2010
- [22] 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
- [23] F. Ciccarelli, A. Del Pizzo, D. Ianuzzi, "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
- [24] 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
- [25] 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
- [26] 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
- [27] L. Grigāns "Rekuperētās elektriskās enerģijas izmantošana pilsētas elektrotransportā, pielietojot superkondensatorus", *Promocijas darba kopsavilkums*, Rīga 2012
- [28] 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
- [29] J. Hayek, A. Genini, G. Skarpetowski, "A laboratory test bench for electrical traction drives", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2008, Wuhan, China
- [30] 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
- [31] P. Drabek, L. Streit, "The energy storage system for public transport vehicles", *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009, Barcelona, Spain
- [32] A. Sierra, V. Herrera, A. Gonzalez-Garrido, A. Milo, H. Gaztanaga, H. Camblong, "Experimental Comparison of Energy Management Strategies for a Hybrid Electric Bus in a Test-bench", *13th International Conference on Ecological and Renewable Energies (EVER)*, 2018

- [33] 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
- [34] A. Rufer, P. Barrade, "A supercapacitor-Based energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] "SITRAS SES, Energy Storage System for 750 V DC Railway," Siemens Transportation Systems, Public. Nr A19100-V300-B276 and B275.
- [38] 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
- [39] Pieejams: http://www.azocm.ua/en/products/?SECTION_ID=64&ID=144
- [40] Pieejams: <http://etp.zp.ua/en/wires/copper-contact-wires-mf-mf-85-mf-100-and-mk-round-and-shaped/>
- [41] Datasheet 3.0V 3400F Ultracapacitor Cell, BCAP3400 P300 K04/05, Maxwell's Highest Power and Energy Cell, Document number: 3002330-EN.2, Maxwell
- [42] H. Hoimoja, "Energy Efficiency Estimation and Energy Storage Calculation Methods for Urban Electric Transportation" Phd Thesis, Tallin University of Technology, Tallin, Estonia, 2009
- [43] U.Sirmelis „Pilsētas elektrotransporta sistēmu modelēšana optimālu enerģijas uzkrājēju parametru izvēlei”, Promocijas darba kopsavilkums, RTU izdevniecība, Rīga 2015
- [44] D. Baumeister, M. Salih, M. Wazifehdust, P. Steinbusch, M. Zdallek, S. Mour, L. Lenuweit, P. Deskovic, H. Ben Zid, "Modelling and Simulation of a Public Transport System with Battery-Trolleybuses for an E-Mobility Integration", 1st E-Mobility Power System Integration Symposium, Berlin, Germany, 2017
- [45] 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, Harbid, China
- [46] Datasheet 125V Heavy Transportation Module, Document number: 1014696.7, Maxwell
- [47] Product Guide – Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors – Doc. No. 1014627.1, 2009 Maxwell Technologies, Inc
- [48] V. Sedlakova, J. Sikula, J. Majzner, P. Sedlak, T. Kuparow, B. Buegler, P. Vasina, "Supercapacitor Degradation Assessment by Power Cycling and Calendar Life Tests", *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 23, 2016, No. 3, pp. 345-358
- [49] A. Paugurs, A. Senfelds, and L. Ribickis, "Impact of industrial robot tool mass on regenerative energy", in *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, Sep. 2017, p. P.1-P.6.

- [50] L. Zubieta and R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, Jan. 2000
- [51] R. Faranda, M. Gallina, and D. T. Son, "A new simplified model of Double-Layer Capacitors", in *2007 International Conference on Clean Electrical Power*, May 2007, pp. 706–710.
- [52] R. Negroiu, P. Svasta, Al. Vasile, C. Ionescu, and C. Marghescu, "Comparison between Zubieta model of supercapacitors and their real behavior", in *2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Oct. 2016, pp. 196–199.
- [53] H. Gualous, H. Louahlia, and R. Gallay, "Supercapacitor Characterization and Thermal Modelling With Reversible and Irreversible Heat Effect", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 3402–3409, Nov. 2011
- [54] Z. Cabrane and S. H. Lee, "Electrical and Mathematical Modeling of Supercapacitors: Comparison", *Energies*, vol. 15, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2022.
- [55] 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.
- [56] S. M. Al-Jaber and I. Saadeddin, "Theoretical and Experimental Analysis of Energy in Charging a Capacitor by Step-Wise Potential", *J. Appl. Math. Phys.*, vol. 8, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2019.
- [57] 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.
- [58] J. F. Pedrayes *et al.*, "A novel analytical solution for the calculation of temperature in supercapacitors operating at constant power", *Energy*, vol. 188, p. 116047, Dec. 2019.



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.