

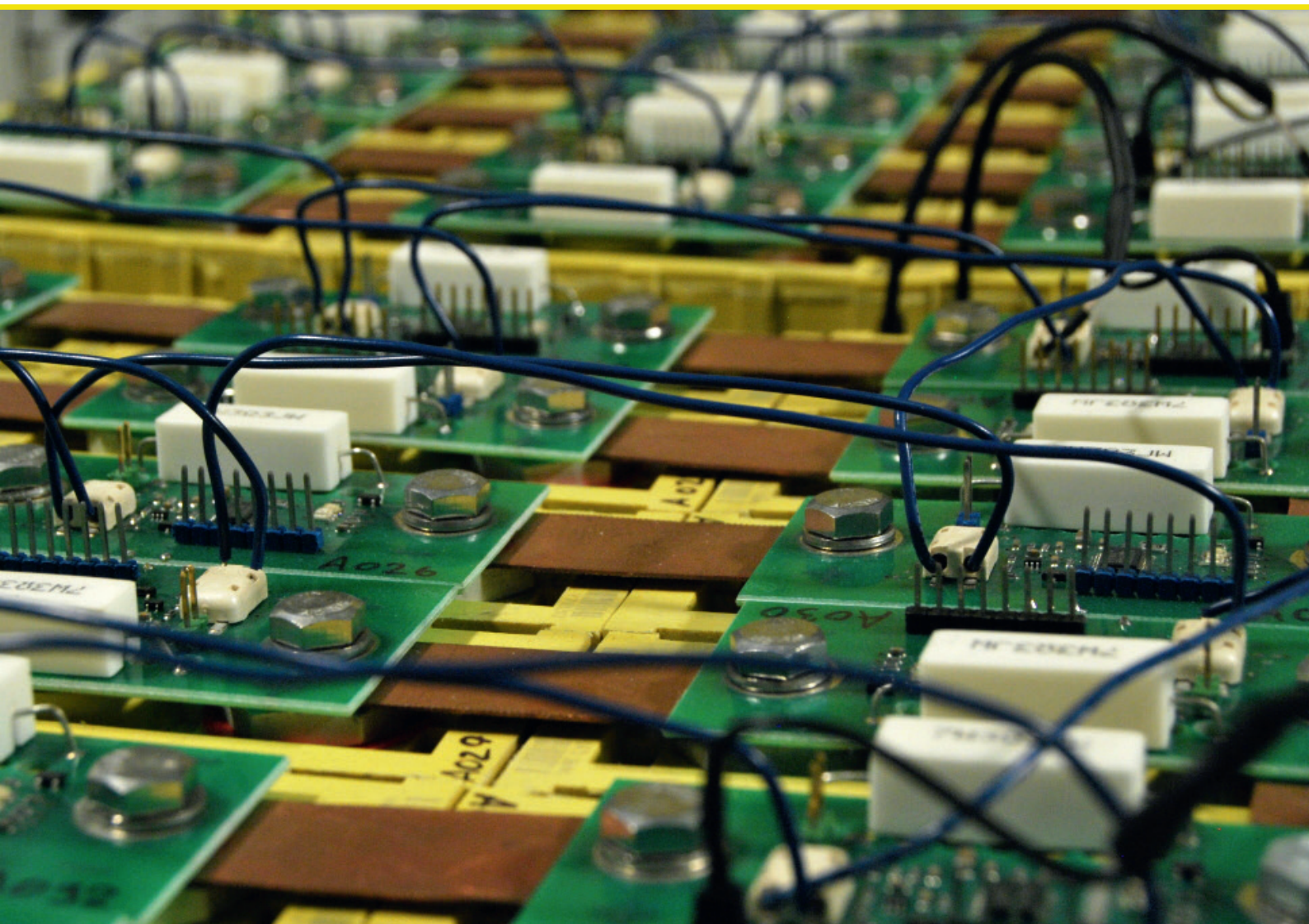


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Kristaps Vītols

INDIVIDUĀLĀS MOBILITĀTES TRANSPORTLĪDZEKĻU AKUMULATORU BATERIJU UN TO BALANSĒŠANAS METOŽU IZSTRĀDE UN IZPĒTE

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Kristaps Vītols

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**INDIVIDUĀLĀS MOBILITĀTES
TRANSPORTLĪDZEKĻU AKUMULATORU
BATERIJU UN TO BALANSĒŠANAS METOŽU
IZSTRĀDE UN IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
IĻJA GALKINS

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Vītols K. Individuālās mobilitātes transportlīdzekļu akumulatoru bateriju un to balansēšanas metožu izstrāde un izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-14” 2022. gada 8. februāra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.1/2.

Šis darbs ir veltīts manai ģimenei

Vāka attēla autors – Aleksandrs Suzdaļenko.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.



Promocijas darbs izstrādāts Eiropas Sociālā fonda “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana specializācijas jomās” vienošanās Nr. 8.2.2.0/18/A/017 ietvaros.

<https://doi.org/10.7250/9789934227677>

ISBN 978-9934-22-767-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 27. maijā plkst. 14.30 Engures novadā, Klapkalnciemā, konferenču un sporta centra “Ronīši” konferenču zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Jānis Zaķis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Ph. D. Enrique Romero-Cadaval*,
Ekstremaduras Universitāte, Spānija

Vadošais pētnieks *Ph. D. Andrei Blinov*,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

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

Kristaps Vītols

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 86 attēli, septiņas tabulas, pieci pielikumi, kopā 165 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 220 nosaukumu.

Saturs

IEVADS	5
GALVENĀ HIPOTĒZE UN UZDEVUMI	5
Hipotēze	5
Uzdevumi	5
Pētniecības metodes un paņēmieni.....	5
Zinātniskās novitātes	6
Praktiskās novitātes	6
Darba praktiskā nozīme.....	6
Darba aprobācija	6
1. ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU BATERIJU ANALĪZE	8
2. LITIJA JONU BATERIJU TEHNOLOĢIJU IZPĒTE	10
3. BATERIJU PĀRVALDĪBAS SISTĒMU ANALĪZE.....	12
4. INDIVIDUĀLU GALVANISKO ELEMENTU TESTĒŠANA UN PĒTĪŠANA....	18
5. BATERIJAS KONFIGURĀCIJAS IZVEIDOŠANA INDIVIDUĀLĀS MOBILITĀTES TRANSPORTLĪDZEKLIM	21
6. ELEMENTU BALANSĒŠANAS SISTĒMAS IZSTRĀDE UN PĀRBAUDE	23
7. UZLABOTAS ELEMENTU BALANSĒŠANAS IZSTRĀDE	26
SECINĀJUMI	29
LITERATŪRA.....	30

IEVADS

Ir acīmredzams pēdējā laika progress dažādu elektrisko transporta līdzekļu (ETL) attīstībā un popularitātē. Pamazām aizvien vairāk un vairāk ETL parādās gan Latvijas tirgū, gan ielās [1]. Tradicionālie iekšdedzes motori tiek papildināti, ieviešot hibrīdās tehnoloģijas, kurās transporta līdzekļa sniegumu papildina elektriskie dzinēji un bateriju pakas. Būtisks pārmaiņu dzinējspēks ir mērķis sasniegt ilgtspējīgu ekonomiku un vides neitralitāti – apturēt klimata pārmaiņas, samazinot siltumnīcas efekta gāzu emisijas [2], [3].

Papildus tradicionālajiem elektromobiļiem ETL klāstu papildina elektriskie individuālās mobilitātes transportlīdzekļi (EIMTL). Šo transportlīdzekļu popularitāti un pieejamību būtiski palielina specializēti nomas uzņēmumi, kas nodrošina īstermiņa un garāka termiņa elektrisko velosipēdu, skrejriteņu un skūteru nomu daudzās valstīs.

E-mobilitāte attīstās arī Latvijā. Rīgas Tehniskā universitāte pāriet uz pilnībā elektrisku transportlīdzekļu bāzi: ir iegādāts vairāk nekā ducis elektromobiļu, kas tiek efektīvi lietoti. Vietējais rallijkrosa transportlīdzekļu izstrādātājs un ražotājs *OSC*, ko vada inženieris un konstruktors Andris Dambis, izstrādā gan elektrisko sacīkšu transportu, gan elektriskos publiskā transporta minibusus [4]. Vēl viens ievērības vērts piemērs ir *Blue Shock Race* komanda, kas izstrādā augstas veiktspējas elektriskos sacīkšu kartingus [5].

Visa šī progresa virzītājspēks ir modernā litija jonu bateriju tehnoloģija. Teju ikvienai litija jonu baterijai ir nepieciešama baterijas pārvaldības sistēma (BPS), kas nodrošina tās korektu darbību. Vienkāršākajā gadījumā BPS var realizēt ar atslēdzošu slēdzi. Lielākās daudzu galvanisko elementu baterijās ir nepieciešamas papildu ķēdes, kas nodrošina elementu līdzsvarotību un optimizē visas pakas veiktspēju. Zinātniskajā literatūrā ir dots plašs dažādu balansēšanas ķēžu un metožu klāsts.

Promocijas darba sākotnējā motivācija ir izstrādāt bateriju paku mācību procesa elektriskajam kartingam – sava veida individuālās mobilitātes transporta līdzeklim.

GALVENĀ HIPOTĒZE UN UZDEVUMI

Hipotēze

Baterijas pārvaldības sistēmas balansēšanas veiktspēju ir iespējams uzlabot, apvienojot divas dažādas balansēšanas metodes divpakāpju balansēšanas risinājumā.

Uzdevumi

1. Analizēt esošās elektrotransporta bateriju sistēmas.
2. Izpētīt litija jonu bateriju tehnoloģijas un analizēt esošās bateriju balansēšanas metodes.
3. Veikt pētniecisku litija jonu elementu testēšanu.
4. Izmantot apgūtās zināšanas, lai izstrādātu bateriju paku mazam elektriskajam transportlīdzeklim.
5. Izstrādāt jaunu divpakāpju balansēšanas sistēmu.

Pētniecības metodes un paņēmieni

Aprēķiniem un datu apstrādei, īpaši – statistiskajai analīzei, tika izmantots *MS Excel*. Datu apstrādei, vizualizācijai un mērījumu procesu automatizācijai tika izmantots *Matlab*, sastādot un izpildot instrumentu vadības programmas kodus. *HxD hex* redaktora programmatūra tika

izmantota neapstrādāto datu izgūšanai no atmiņas kartēm, kas tika izmantotas galvanisko elementu datu ierakstam. *LTspice* tika izmantots dažādu izstrādāto shēmu daļu sākotnējai modelēšanai.

Izstrādes un eksperimentālās testēšanas laikā tika izmantots laboratorijas aprīkojums dažādās konfigurācijās. Izmantotā aprīkojuma saraksts ietver dažādus barošanas avotus, osciloskopus ar taustiem, termālo attēlu kameru, bateriju pilnās pretestības mēriekārtu, elektroniskās slodzes, jaudas analizatoru, kā arī vairākus multimetrus.

Promocijas darba gaitā tika izmantoti daži *MSP430* saimes mikrokontrolleri, kuru programmēšanai izmantota *IAR Embedded Workbench* (pārsvarā asamblervalodā) un *Code Composer Studio* (pārsvarā *C* valodā) programmēšanas vide. Programmatūra *Orcad Capture*, *Layout* un *PCB editor* lietota, lai izstrādātu lielāko daļu spiesto plašu. Dažkārt izmantota arī *Altium designer* programmatūra. Eksperimentālās plates tika izgatavotas laboratorijā, izmantojot *PCB* frēzi, savukārt pārbaudītie projekti tika izgatavoti rūpnieciski.

Zinātniskās novitātes

1. Pirmo reizi apvienotas šuntējošo rezistoru un vairāku sekundāro tinumu transformatoru metodes, izveidojot divpakāpju balansēšanas risinājumu.
2. Piedāvāta jauna bateriju balansēšanas metožu klasifikācija, kas esošās metodes iedala izkliedējošās, selektīvās lādēšanas/izlādēšanas un lādiņa pārneses metodēs.
3. Sniegta nelietotu galvanisko elementu parametru statistiskā analīze, kas liecina par nelielu parametru izkliedi, kas savukārt attaisno šuntējošo rezistoru balansēšanas metodes lietojumu.

Praktiskās novitātes

1. Sniegta ratiņkrēsla mobilitātes transportlīdzekļa baterijas sprieguma un konfigurācijas izvēles procesa analīze.
2. Izstrādāta modulāra šuntējošo rezistoru balansēšanas plate ar ziedlapķēdes datu apmaiņas sistēmu.
3. Izstrādāta procedūra un aparatūra, lai kalibrētu gan sprieguma, gan temperatūras mērījumus izstrādātajām balansēšanas platēm.

Darba praktiskā nozīme

1. Izstrādātā šuntējošo rezistoru balansēšanas plate (2. versija) izmantota elektriskā kartinga 20 elementu baterijas pakā.
2. Izstrādātā šuntējošo rezistoru balansēšanas plate (3. versija) izmantota līdzsprieguma mikrotīkla bateriju uzkrājēja sistēmas 144 elementu baterijas pakā.
3. Sniegtais baterijas izstrādes process ir lietots, izstrādājot bateriju paku asistējošās piedziņas ratiņkrēsliem.

Darba aprobācija

Kopumā ir 33 publikācijas, kā arī sarakstīta viena grāmatas nodaļa. Nākamās 13 publikācijas ir iekļautas promocijas darbā.

1. R. Zemnieks and **K. Vitols**, “Automation of Battery Impedance Measurement Using Matlab,” in *2020 IEEE 61st Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2020 – Proceedings*, 2020.
2. **K. Vitols** and A. Podgornovs, “Impact of battery cell configuration to powered wheelchair drive efficiency,” *Arch. Electr. Eng.*, vol. 69, no. 1, pp. 203–213, 2020.
3. **K. Vitols** and E. Grinfogels, “Battery Batch Impedance Analysis for Pack Design,” in *2019 IEEE 7th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, 2019, pp. 1–5.
4. **K. Vitols**, E. Grinfogels, and D. Nikonorovs, “Cell Capacity Dispersion Analysis Based Battery Pack Design,” in *2018 6th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, 2018, no. 1, pp. 1–5.
5. **K. Vitols** and E. Poiss, “Development of Electric Scooter Battery Pack Management System,” in *2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2018, pp. 1–5.
6. **K. Vitols** and A. Podgornovs, “Concept of cost-effective power-assist wheelchair’s electrical subsystem,” in *2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, 2017, pp. 1–4.
7. **K. Vitols**, “Efficiency of LiFePO₄ battery and charger with a mixed two level balancing,” in *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2016, pp. 1–4.
8. **K. Vitols**, “Efficiency of LiFePO₄ Battery and Charger with Passive Balancing,” in *AIEEE 2015*, 2015.
9. **K. Vitols**, “Lithium ion battery parameter evaluation for battery management system,” in *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2015, pp. 1–4.
10. **K. Vitols**, “Design considerations of a battery pack – DC grid interface converter,” in *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2015, vol. 2015 pp. 476–479.
11. **K. Vitols** and I. Galkin, “Evaluation of cell balancing solution with a custom energy measurement device design,” in *2014 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2014*, 2014.
12. **K. Vitols**, “Redesign of passive balancing battery management system to active balancing with integrated charger converter,” in *2014 14th Biennial Baltic Electronic Conference (BEC)*, 2014, pp. 241–244.
13. **K. Vitols**, “Design of an embedded battery management system with passive balancing,” in *2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC)*, 2014, pp. 142–146.

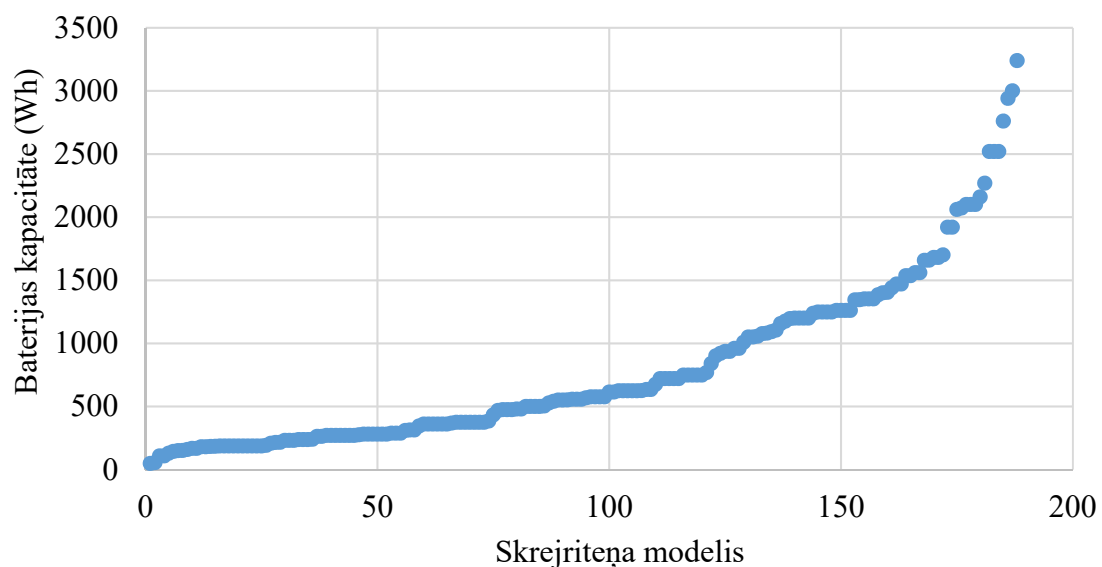
1. ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU BATERIJU ANALĪZE

Tika apskatīts vieglais elektriskais transports, lai iegūtu datus par bateriju konstrukciju un balansēšanas veiktspēju. *Volkswagen e-up!* sākotnēji 2012. gadā bija aprīkots ar tikai 18,7 kWh bateriju paku, kas nodrošināja 130 km nobraukumu. Šī brīža *e-up!* versija ir aprīkota ar 32,3 kWh bateriju, kas nodrošina līdz 260 km nobraukumu [6]. *Nissan Leaf* bija aprīkots ar 24/30 kWh litija jonu bateriju, savukārt jaunākā versija ir aprīkota ar 40 kWh bateriju, kas veidota, izmantojot 192 NMC maisiņa formas elementus [7]. Amatieru iegūtie BPS plašu attēli norāda, ka elementu monitoringam un balansēšanai tiek izmantotas speciāli pielāgotas mikroshēmas [8]. Tiek izmantota šuntējošā rezistora balansēšana ar vienu 430 Ω rezistoru uz katru elementu pāri. Elementi ir izkārtoti *96S2P* konfigurācijā, tāpēc var aprēķināt, ka katra pāra kapacitāte ir ap 116 Ah un rezistors nodrošina balansēšanas strāvu, kas ir mazāka par 10 mA. 0,000084 A/Ah strāva ir izvēlēta, lai veiktu balansēšanu. *BMW i3* baterija ir veidota no augstas ietilpības prizmatiskajiem NMC elementiem ar 22 kWh, 33 kWh un 42,2 kWh ietilpību [9]. *Linear Technologies* neatkarīgā *LTC6801* daudzelementu baterijas kļūdu monitoringa mikroshēma un adresējamā *LTC6802-2* daudzelementu baterijas monitoringa mikroshēma no izmantota, lai pārraudzītu elementu spriegumus un temperatūras, kā arī veiktu šuntējošo rezistoru balansēšanu [10]. *2512* izmēra 56 Ω virsmas montāžas rezistori ir izmantoti, lai balansētu katru elementu ar 75 mA jeb 0,00125–0,000625 A/Ah. *Tesla S* izmanto *18650* izmēra *Panasonic* galvaniskos elementus, kas, visticamāk, ir NCA tipa litija jonu tehnoloģijā. Ņemot vērā amatieru pētījumus, vas secināt ka baterija ar 85 kWh kapacitāti ir veidota *96S74P* konfigurācijā, tādējādi pilnībā uzlādētas baterijas spriegums sasniedz 400 V [11]. 74 paralēlie elementi tiek dēvēti par bloku (angļu val. *brick*). Seši virknē saslēgti bloki veido moduli, savukārt 16 virknē saslēgti moduļi veido bateriju paku. Katrs modulis ir aprīkots ar lokālu baterijas pārvaldības plati, kuras pamatā ir *BQ76PL536A* baterijas pārraudzības un sekundārās aizsardzības mikroshēma [12]. Šī mikroshēma kontrolē arēju tranzistoru, kas pieslēdz četrus *1206* izmēra 158 Ω rezistorus elementam, kam jāveic balansēšana. Var aprēķināt, ka 106 mA balansēšanas strāva tiek izmantota, lai izlādētu 244 Ah “elementu” (bloks, kas veidots no 76 elementiem), tātad tiek izmantota tikai 0,00043 A/Ah balansēšanas strāvas proporcija. Vieglie elektromobiļi pārsvarā izmanto litija jonu baterijas ar NMC katodu, izņemot uzņēmumu *Tesla*, kas izmanto NCA katoda materiālu [13]. Elementu uzlādes līmeņa izlīdzināšanai tiek izmantota šuntējošā rezistora balansēšana ar strāvu diapazonā no 84 μ A līdz 1,25 mA uz katru elementa ampērstundu.

Tirgū ir arī dažādi elektriskie individuālās mobilitātes transportlīdzekļi, kas ir mazāki par tipisku automobili. Populārākie divriteņu transportlīdzekļi ir elektriskie divriteņi un skrejriteņi ar 36 V litija jonu baterijām. Nominālā sprieguma diapazons gan ir plašāks: 12 V–72 V. Tipiski divriteņu spriegumi ir 24 V, 36 V un 43 V [14]. Lielākajā daļā gadījumu informācija par baterijas elementiem nav pieejama, dažos gadījumos ir norādīts, ka baterija veidota, izmantojot *18650* izmēra NMC elementus. Arī internetā apskatāmie amatieru video liecina par to, ka biežāk sastopamais izmērs ir *18650* [15]. Alternatīvi tiek lietots arī *26650* un *20700/21700* izmērs un LFP katoda materiāls. Apskatīto bateriju enerģijas ietilpība variēja no 200 Wh līdz 750 Wh ar izteiktām 400 Wh un 500 Wh grupām.

Skrejriteņu tirgus analīze atklāja plašu modeļu klāstu ar dažādu veiktspēju. Pazīstamais interneta veikals *Banggood* piedāvā 101 elektrisko skrejriteņi, savukārt *Amazon* piedāvājums ietver ap 240 produktiem, starp tiem ir elektriskie skrejriteņi, to detaļas, vienriteņi, līdzsvara dēļi un citi netradicionāli transportlīdzekļi un to daļas. Tika apkopoti 16 specializētu interneta veikalu piedāvājumi, lai iegūtu informāciju par 238 elektriskajiem skrejriteņiem. Lēnākie skrejriteņi ir aprīkoti ar vienu 90–200 W ķēdes pievada dzinēju. Šo modeļu 12 V vai 24 V spriegumu nodrošina virknē slēgtas svina skābes baterijas ar kopējo kapacitāti 100–200 Wh diapazonā. Dārgāki modeļi ir aprīkoti ar moderniem ritenī iebūvējamiem dzinējiem un 36 V litija jonu baterijām ar kapacitāti līdz 200 Wh. Modeļi, kas spēj pārvietoties ar ātrumu 25 km/h, pārsvarā aprīkoti ar priekšas vai aizmugures piedziņas ritenī iebūvētajiem dzinējiem ar jaudu 250–350 W. 36 V baterijas tiek veidotas no *18650* izmēra litija jonu elementiem ar kopējo ietilpību 150–300 Wh. Skrejriteņi, kas spēj sasniegt lielāku ātrumu (līdz 120 km/h), joprojām izmanto *18650* izmēra elementus, taču ar augstāku kopējo spriegumu (48–72 V) un lielāku ietilpību (300–3000 Wh). Skrejriteņu modeļu iedalījums pēc bateriju kapacitātes redzams 1.1. attēlā.

Apkopojot iepriekš teikto, ir acīmredzams, ka visu veidu bateriju elektrotransports izmanto litija jonu baterijas. Lielākā daļa no baterijām ir ar NMC un NCA katodiem, lai gan atsevišķos gadījumos tiek lietoti LFP un LTO materiāli. Šīs nodaļas mērķis bija sniegt ieskatu elektrotransporta bateriju balansēšanā izmantotajās balansēšanas metodēs, taču diemžēl ražotāji npublicē informāciju par savu produktu BPS. Lietderīga informācija ir iegūstama no amatieru pētījumu video, kā arī no profesionālām tehnoloģiju un produktu analīzes atskaitēm, kas gan ir pieejamas tikai par maksu. No pieejamās informācijas tika secināts, ka dominējošā ir šuntējošā rezistora balansēšanas metode. Pat lielās bateriju pakās (20–100 kWh) pietiek ar maziem virsmas montāžas rezistoriem, lai izkliedētu lieko enerģiju. Līdz ar to rodas jautājumi: vai galvaniskie elementi kļuvuši tik kvalitatīvi, ka atšķirības ir niecīgas; vai bateriju pakas dizains ir progresējis tik tālu, ka visiem elementiem tiek nodrošināti vienādi apstākļi; vai elementu enerģijas atšķirība ir īstā problēma; vai ir nepieciešama lielas strāvas/īsa laika balansēšana.



1.1. att. Apskatīto elektrisko skrejriteņu bateriju kapacitātes iedalījums.

2. LITIJA JONU BATERIJU TEHNOLOĢIJU IZPĒTE

Pēdējās desmitgadēs litija jonu bateriju tehnoloģija ir strauji attīstījusies, ieņemot nozīmīgu tirgus daļu. Tiek uzskatīts, ka gan pašas bateriju tehnoloģijas, gan saistīto tehnoloģiju tirgus nākotnē tikai pieaugs [16]. Litija jonu bateriju kopējā tirgus vērtība tiek lēsta ap 30 miljardiem eiro, un tiek sagaidīts četrkārtējs pieaugums šīs desmitgades laikā [16]. 30 gadu komercializācijas periodā litija jonu tehnoloģija ir kļuvusi par dominējošo bateriju tehnoloģiju, un tai ir lielas izaugsmes iespējas.

Tiek izšķirti seši pazīstami litija jonu paveidi jeb sastāvi, kas atšķiras ar elektrodu sastāvu. Lielākā dažādība ir pozitīvajam elektrodam (katodam), kam var būt pieci sastāvi: LCO, LMO, NMC, NCA un LFP. Negatīvais elektrods (anods) parasti tiek veidots no oglekļa, bet tam var izmantot arī LTO. Elektromobiļos populārs ir NMC paveids. Sākotnēji tā sastāva attiecība bija 1 : 1 : 1 (niķelis, mangāns, kobalts), līdz ar to precīzāks nosaukums ir NMC111. Sastāvs ir ticis uzlabots, samazinot kobalta daudzumu un iegūstot NMC622 paveidu. Tiek sagaidīts, ka tuvā nākotnē par dominējošo paveidu kļūs NMC811 ar vēl zemāku kobalta daudzumu. Būtiskākā atšķirība starp šiem sastāviem ir īpatnējā enerģija, kas tiek palielināta.

Litija jonu bateriju gadījumā ir jāizvairās no pilnas izlādes, lai palielinātu baterijas mūžu. Izlādes dziļums (*DoD*) var tikt aprēķināts, izmantojot 2.1. formulu:

$$DoD = \frac{I_{DCH} \cdot t_{DCH}}{C_{nom}} \cdot 100 \%, \quad (2.1.)$$

kur: *DoD* – izlādētā kapacitāte, %;

I_{DCH} – izlādes strāva, A;

t_{DCH} – izlādes laiks, h;

C_{nom} – nominālā kapacitāte, Ah.

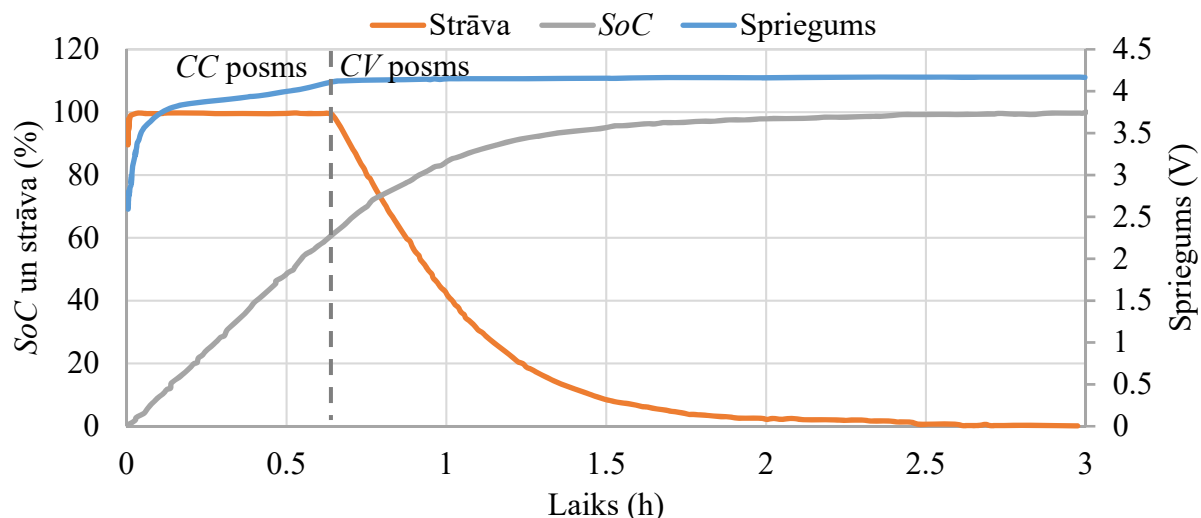
Bieži vien izlādes dziļuma vietā tiek lietota tā invertētā vērtība – uzlādes stāvoklis (*SoC*). Izlādes ātrums ietekmē elementa spriegumu – pie lielas izlādes spriegums samazinās vairāk. Dažkārt ir lietderīgi samazināt atslēgšanas spriegumu, lai sasniegtu izvēlēto gala izlādes dziļumu. Lielākajai daļai litija jonu bateriju pie zemas izlādes strāvas spriegums samazinās lineāri, taču beigās kritums ir straujāks. Tomēr, ja strāva ir liela, tad beigu kritums izlīdzinās, bet sākotnējais kritums pieaug. Izlādes sniegumu būtiski ietekmē baterijas temperatūra, īpaši, ja tā ir samazināta. Lielākajai daļai litija jonu paveidu pieejamā kapacitāte strauji samazinās zemā temperatūrā (zem $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$).

NMC nominālais spriegums ir 3,6–3,7 V atkarībā no katoda precīzā sastāva. Atslēgšanas spriegums variē no 2,7 V līdz 3 V ar 2,5 V absolūti minimālo vērtību. NMC tiek uzskatīts par vadošo litija jonu bateriju paveidu, kas spēj veidot elementus gan ar augstu enerģiju, gan jaudu pie liela ciklu skaita. Īpatnējā enerģija pārsniedz 200 Wh/kg, izlādes strāvas – 2C. Vairāk nekā 60 % bateriju ir NMC, un to lietojums elektrotransportā pārsniedz 50 %.

NCA nominālais spriegums ir 3,6 V, atslēgšanas spriegums – 2,5 V. NCA tiek uzskatīts par enerģijas paveidu ar labu jaudas spēju un ilgu mūžu. Turklāt elektromobiļu ražotājs *Tesla* kopā ar bateriju ražotāju *Panasonic* ir nodemonstrējis praksē, ka ar šo paveidu var izveidot bateriju pakas ar 200 €/kWh izmaksām, izmantojot cilindriskus *18650* elementus [17].

LFP nominālais spriegums ir 3,2 V, savukārt atslēgšanas spriegums variē 2,0–2,5 V robežās. Sprieguma līkne izlādes laikā ir plakana ar straujām izmaiņām abos līknes galos. Neskatoties uz to, ka materiālu izmaksas ir zemas, LFP elementi ir relatīvi dārgi, jo to īpatnējā enerģija ir zema. Priekšrocības ir augsta jauda, augsta drošība un ilgs mūžs, korekti lietojot. Drošība iekļauj ķīmisko un termisko stabilitāti, kā arī paaugstinātu toleranci pret pārlādēšanu un īsslēgumu.

Litija jonu bateriju lādēšanai tiek lietota *CCCV* metode. Ir divi galvenie lādēšanas posmi: ātrais konstantās strāvas (*CC*) posms un lēnais konstantā sprieguma (*CV*) posms, kā redzams 2.1. attēlā. Ja baterija ir dziļi izlādēta, pirms pilnas strāvas *CC* posma jāveic priekšuzlāde [18].

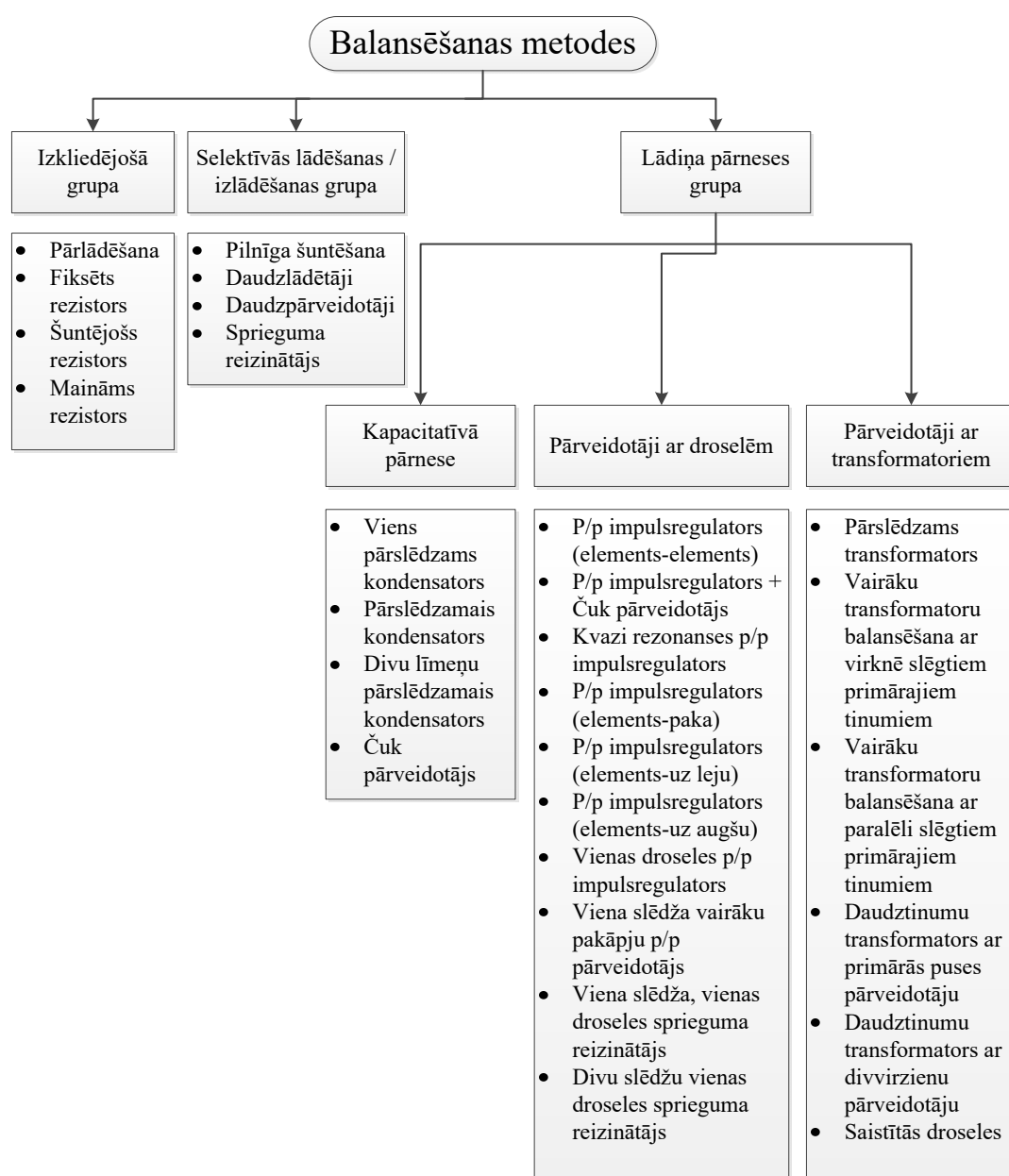


2.1. att. NMC elementa lādēšanas grafiks. Strāva norādīta procentos, 100 % atbilst 1C lielumam.

Baterija saņem lielāko daļu lādiņa *CC* lādēšanas posmā. Tipiskais lādēšanas strāvas lielums ir 0,5C, kas rezultē aptuveni 2–2,5 stundu pilnajā uzlāde (ieskaitot *CV* posmu). Ātrāka uzlāde ir panākama ar 1C vai pat 2C strāvas lielumu. Pie zemas lādēšanas strāvas lielākā daļa laika pāriet *CC* posmā, kura laikā baterija tiek uzlādēta līdz 80–90 %. *CC* posms beidzas, kad tiek sasniegts lādēšanas sprieguma līmenis un notiek pāreja uz *CV* posmu, kura laikā baterija saņem atlikušo lādiņu. Lādēšana *CV* posmā notiek lēnāk, jo strāva pamazām samazinās. Ja *CC* posmā strāva ir liela, elementa silšanas un omiskā krituma dēļ lādēšanas spriegums tiek sasniegts ātrāk [19]. LCO, LMO, NMC un NCA paveidiem lādēšanas spriegums ir 4,2 V. Pazemināts lādēšanas spriegums rada mazāku uzkrājamo enerģiju – to var izmantot, lai samazinātu lietojamo kapacitātes diapazonu. Samazināta lietojamā kapacitāte palielina ciklu skaitu/mūžu. Turklāt litija jonu baterijas elementa atrašanās pie maksimālā sprieguma izraisa vispārēji paātrinātu degradāciju. Samazināts maksimālais spriegums samazina iekšējo ķīmisko “spriegumu” un veicina ilgāku kalendāro mūžu [20]. Lai daudzelementu baterija sasniegtu savu maksimālo uzlādes līmeni, ir jāveic elementu balansēšana, izmantojot balansēšanas ķēdi. Lielas atšķirības starp elementiem izraisa ilgu balansēšanu, ko var saīsināt, izvēloties balansēšanas metodi ar lielāku veikspēju. Alternatīvu baterijas paku var veidot no vienādiem (atlasītiem) elementiem, nodrošinot tiem vienmērīgus darba apstākļus, tādējādi veicinot vienmērīgu novecošanu.

3. BATERIJU PĀRVALDĪBAS SISTĒMU ANALĪZE

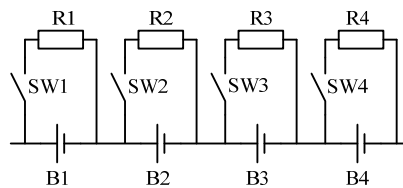
Gadu gaitā ir piedāvātas daudzas dažādas metodes, lai izlīdzinātu bateriju elementu spriegumus vai uzlādes līmeņus. Šīs metodes tiek iedalītas divās grupās: pasīvā un aktīvā. [21], [22], [23], [24]. Dažos avotos pasīvās metodes ir tās, kas lieko enerģiju izkliedē kā siltumu. Tradicionāla pasīvās balansēšanas metode ir rezistora pieslēgšana paralēli katram elementam, lai veiktu balansēšanu. Aktīvās balansēšanas metodes pārvieto lādiņu no elementiem ar augstāku uzlādes līmeni uz elementiem ar zemāku līmeni. Ķēde ar vadāmiem slēdžiem, kondensatoriem vai spolēm tiek izmantota, lai realizētu lādiņa pārnesei. Dažos avotos šuntējošā rezistora metode tiek iekļauta aktīvajās metodēs – iespējams, tādēļ, ka rezistora pieslēgšanai un atslēgšanai tiek izmantots slēdzis. Abas grupas alternatīvi varētu saukt arī par izkliedējošām un neizkliedējošām. Šajā promocijas darbā tiek piedāvāts tālāk sadalīt neizkliedējošo grupu selektīvās lādēšanas/izlādēšanas grupā un lādiņa pārnesei grupā, kā redzams 3.1. attēlā.



3.1. att. Balansēšanas metožu klasifikācija.

Izkliedējošo metožu grupa apvieno metodes, kas lieko enerģiju pārvērš siltumā, izmantojot elektronikas komponentu pretestību, kā arī pārlādēšanas paņēmieni. Selektīvās lādēšanas/izlādēšanas grupai pieder dažādi papildinošie lādētāji, pilnās šuntēšanas un baterijas pārkonfigurēšanas metodes. Savukārt lādiņa pārnese grupa izmanto kapacitatīvās pārnese vai transformatoru/droseļu pārveidotājos balstītas pārnese metodes.

Visbiežāk lietotā balansēšanas metode ir šuntējošā rezistora metode, kas angļu valodas avotos tiek saukta dažādi. Pamatdarbība ietver rezistora pieslēgšanu tam baterijas elementam, kura uzlādes līmenis vai spriegums ir pārsniedzis iestatīto sliekšni. Rezistors izlādē pieslēgto elementu, pārvēršot lieko elementa enerģiju siltumā, līdz tā uzlādes līmenis vai spriegums sasniedz atslēgšanas sliekšni. Metodes topoloģija redzama 3.2. attēlā.



3.2. att. Šuntējošā rezistora balansēšanas topoloģija.

Šuntējošā rezistora balansēšanas metode ir pazīstama ar drošumu un vienkāršību [22], [21], [23], [25]. Šo metodi var lietot arī decentralizēti, neizmantojot vadošo kontrolleri, kas noteiktu vadības līmeņus. Tādā gadījumā katrs baterijas elements tiek aprīkots ar vienādu shēmu, kas veic elementa parametru mērījumus un vajadzības gadījumā pieslēdz šuntējošo rezistoru. Tomēr bez vadošā kontrolera nevar notikt datu apmaiņa un kopējo baterijas pakas parametru uzraudzība. Centralizēta vadība ar vadošo kontrolleri var uzlabot baterijas lādēšanas procesu, dinamiski mainot šuntēšanas līmeni, kā arī kontrolējot pašu lādēšanas procesu. Centralizēta vadība var nodrošināt pilnvērtīgu baterijas pārvaldības sistēmu ar attiecīgām funkcijām, par pamatu ņemot elementu mērījumu datus no elementu balansēšanas platēm.

Šuntējošā rezistora balansēšana var tikt izmantota gan uzlādes, gan izlādes balansēšanai – pārsvarā gan tiek izmantota uzlādes balansēšana, jo tādā veidā tiek nodrošināts augstāks atlikušais lādiņš pie izlādētas bateriju pakas – nekad netiek sasniegta pilnīga izlāde. Šādā režīmā elementa lādēšanas strāvu var aprēķināt, izmantojot 3.1. formulu, kur I_{chg} ir pilnā lādēšanas strāva, V_{cell} – elementa spriegums, R_{bal} – šuntējošā rezistora pretestība, R_{on} – slēdža pretestība. Daļa no lādēšanas strāvas tiek šuntēta ar šuntēšanas rezistoru.

$$I_{cell} = I_{chg} - \frac{V_{cell}}{R_{bal} + R_{on}} \quad (3.1.)$$

Ar šuntējošo rezistoru veiktai lādēšanas balansēšanai var veikt zudumu analīzi. Lādēšanas laikā zudumu jauda P_{loss} ir 0, ja neviens no rezistoriem nav aktivizēts – ja baterijas elementi ir vienādi un labi balansēti, tad šāds stāvoklis ir spēkā lielāko daļu lādēšanas laika. Kad lādējot pirmais elements sasniedz pilnu spriegumu/balansēšanas spriegumu (V_{bal}), tiek pieslēgts tā šuntēšanas rezistors un lādēšanas strāva tiek samazināta, lai atbilstu šuntēšanas strāvai (idealizēts gadījums): $I_{chg} = I_{bal}$.

Rezultātā konkrētās šūnas uzlādes līmenis nepieaug, taču rodas balansēšanas zudumi, kas atbilst 3.2. vienādojumam:

$$P_{cell_loss} = V_{bal} \cdot I_{bal}. \quad (3.2.)$$

Pakāpeniski arī pārējie elementi sasniedz balansēšanas spriegumu. Līdz ar to pieaug arī kopējie zudumi, ko var aprēķināt, izmantojot 3.3. formulu. Visbeidzot $n - 1$ elementi ir uzlādēti, un tiek lādēts tikai viens elements – P_{loss} ir sasnieguši savu maksimālo lielumu, ko var aprēķināt, izmantojot 3.4. formulu. Pēdējam elementam sasniedzot balansēšanas spriegumu, lādēšana tiek pārtraukta, līdz ar to P_{loss} vērtība kļūst vienāda ar 0.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_{bal}} P_{cell_loss_i} \quad (3.3.)$$

$$P_{loss_max} = (n-1) \cdot V_{bal} \cdot I_{bal} \quad (3.4.)$$

Balansēšanas zudumu jaudas funkcija ir diskrēta, jo zudumu jauda pieaug pakāpienveidīgi no 0 līdz tās maksimālajai vērtībai, kad tiek šuntēts $n - 1$ elements. Katra diskrētā pakāpiena ilgums ir atkarīgs no elementu līmeņu atšķirības lādēšanas laikā.

Balansēšanas procedūras kopējie enerģijas zudumi ir lietderīgāks lielums, jo to var viegli salīdzināt ar citu metožu balansēšanas enerģijas zudumiem. Balansēšanas enerģijas zudumi ir integrālis no balansēšanas jaudas zudumiem:

$$E_{loss} = \int_0^{full} P_{loss}(t) dt, \quad (3.5.)$$

kur: E_{loss} – kopējie balansēšanas enerģijas zudumi, Wh;
 $P_{loss}(t)$ – balansēšanas jaudas zudumu funkcija, W;
 $full$ – laiks, kurā tiek pārtraukta balansēšana, s.

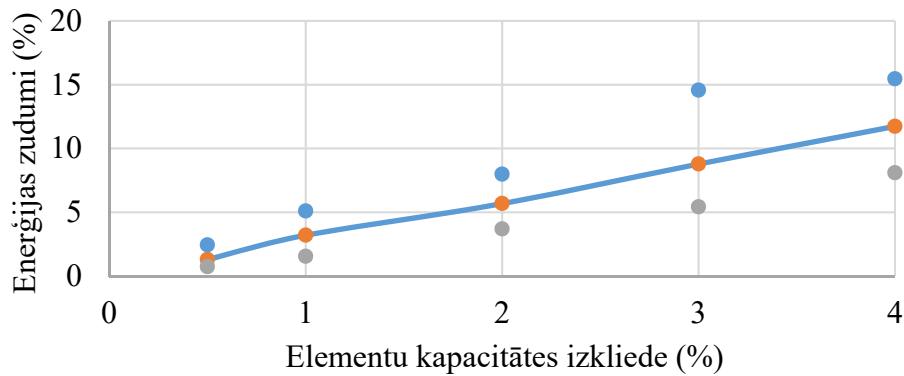
Integrēšanas intervāls ir no balansēšanas procedūras sākuma līdz tās beigām, kad pēdējais elements sasniedz pilnu spriegumu. $P_{loss}(t)$ ir diskrēta funkcija, tāpēc E_{loss} var tikt izteikti kā individuālu P_{loss} līmeņu summa:

$$E_{loss} = \sum_{x=1}^{n-1} (x V_{bal} (\Delta C_{x+1} - \Delta C_x)), \quad (3.6.)$$

kur: E_{loss} – kopējie balansēšanas enerģijas zudumi, Wh;
 n – baterijas elementu skaits;
 V_{bal} – balansēšanas spriegums, V;
 ΔC – relatīvā kapacitātes atšķirība, Ah.

ΔC lielums ir specifisks katram elementam – tas norāda kapacitātes relatīvo atšķirību attiecībā pret vienu elementu, kas tiek balansēts, un pret nākamo balansējamo elementu. Pirmajam elementam $\Delta C_1 = 0$, katram nākamajam ΔC_x vērtību var noteikt kā starpību, zinot iepriekšējā elementa C_{x-1} vērtību un paša elementa C_x vērtību. Ja ΔC vērtību diapazons un izkliede ir maza, tad rezultējošie E_{loss} arī būs mazi. 3.6. vienādojumu var izmantot, lai aprēķinātu enerģijas zudumus 20 elementu baterijai, kuras elementu kapacitāte atbilst normālsadalījumam, pie

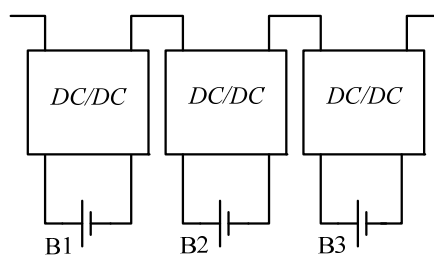
dažādām kapacitātes dispersijām. 3.3. attēlā redzams iegūtais grafiks. Katrai kapacitātes dispersijas vērtībai (no 0,5 % līdz 4 %), izmantojot normālsadalījuma gadījuma skaitļu ģeneratoru, tika izveidotas 10 kopas. Līnija norāda vidējos enerģijas zudumus. Punkti atzīmē veikto aprēķinu maksimālos un minimālos zudumus. Ja baterijas elementu kapacitātes atbilst normālsadalījumam, tad balansēšanas zudumi pieaugs lineāri, pieaugot elementu kapacitātes dispersijai.



3.3. att. 20 elementu baterijas balansēšanas enerģijas zudumi ar šuntējošo rezistoru metodi pie dažādiem elementu kapacitātes dispersijas līmeņiem.

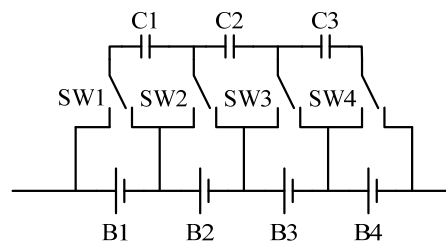
Par spīti kritikai, zinātniskajā literatūrā ir vairākas publikācijas, kurās dažādos veidos tiek lietota šuntējošā rezistora metode [26], [24], [27]. Tradicionāli šuntējošā rezistora metode tiek uzskatīta par neefektīvu, un tieši šis arguments tiek izmantots, lai attaisnotu citu metožu izstrādi [22], [21], [23], [28], [29]. Tomēr, apskatot tirgu, ir pieejami ļoti daudzi integrēti balansēšanas risinājumi, kuros izmantota tieši šuntējošā rezistora balansēšanas metode.

Perspektīvs selektīvās lādēšanas/izlādēšanas grupas paņēmieni ir daudzpārveidotāju metode. Šos pārveidotājus mēdz dēvēt arī par pilnā tilta daudzlīmeņu pārveidotājiem vai modulārajiem daudzlīmeņu pārveidotājiem. Pamatizpildījumā katrs baterijas elements [30] vai elementu grupa [31] tiek aprīkota ar divvirzienu pārveidotāju (parasti pilno tiltu). Pārveidotāju izejas tiek slēgtas virknē, tādējādi izveidojot bateriju (3.4. att.). Vadot pārveidotājus, var panākt katra elementa selektīvu lādēšanu, izlādēšanu. Šīs metodes īpašā priekšrocība ir tā, ka pārveidotāju bateriju var izmantot kā galveno pārveidotāju, piemēram, kā daudzlīmeņu invertoru, kas darbinā dzinēju [32], [33] vai ir pieslēgts tīklam [30], [34], [31]. Katrs pārveidotājs sastāv no pusvadītāju slēdžiem ar vadāmības pretestību, tāpēc rodas papildu zudumi. Kā norādīts [30], nepilnvērtīga slēdžu lietošana var izraisīt vispārēju sistēmas zudumu pieaugumu. Būtisks šīs metodes izaicinājums ir vadība. Tai jāspēj noteikt un sekot līdzi katra elementa uzlādes līmenim un vadīt pārveidotājus tā, lai visi elementi tiek vienmērīgi gan uzlādēti, gan izlādēti.



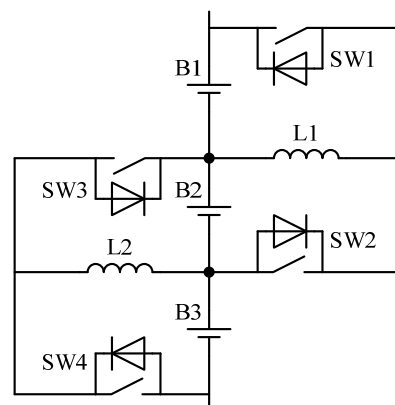
3.4. att. Daudzpārveidotāju balansēšanas topoloģija.

Populāra kapacitatīvās pārnese metode ir pārslēdzamo kondensatoru balansēšanas metode (3.5. att.) [35], [36], [37], [38]. Šajā risinājumā tiek izmantoti $n - 1$ kondensatori (n ir elementu skaits). Divvirzienu divpolu (SPDT) slēdžu skaits sakrīt ar elementu skaitu. Šī metode pārnēs enerģiju no viena elementa uz tā blakus elementu, līdz ar to būtisks trūkums ir lēna balansēšana un zema lietderība, ja atšķirīgie elementi atrodas tālu cits no cita. Tomēr būtiska priekšrocība ir salīdzinoši augstā modularitāte [23]. Sniegumu ir iespējams uzlabot, papildinot shēmu ar vienu kondensatoru un slēdžu komplektu, lai savienotu baterijas pirmo un pēdējo elementu [39], tādējādi izveidojot balansēšanas cilpu. Šo metodi var papildināt arī ar augstākiem kondensatoru līmeņiem, veidojot piramīdas struktūru. Papildu līmeņi var pārnēsēt enerģiju, izlaižot elementus pa vidu. Papildu līmeņi samazina balansēšanas laiku un zudumus.



3.5. att. Pārslēdzamo kondensatoru balansēšanas topoloģija.

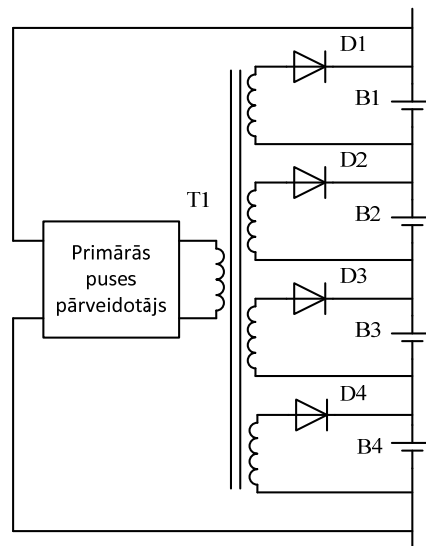
Populāra spoļu pārnese metode ir paaugstinošā un pazeminošā impulsregulatora topoloģija [23], [40], [28], [41], [42]. Topoloģijas shēma ar diviem individuāliem balansētājiem redzama 3.6. attēlā. Tā veic lādiņa pārnēsi no elementa uz elementu, kas atrodas blakus. Viens balansētājs tiek pievienots elementu pārim, līdz ar to n elementiem nepieciešami $n - 1$ balansētāji. Paaugstinošā un pazeminošā pārveidotāja topoloģijas trūkumi ir lielas strāvas pulsācijas un šaurs aizpildījuma koeficienta diapazons. Tomēr šī metode izmanto tikai vienu droseli, līdz ar to tā ir relatīvi lēta un vienkārši modularizējama. Metode tiek izmantota arī kā komerciāls integrēts risinājums, kas liecina par tās priekšrocībām [43].



3.6. att. Paaugstinošā un pazeminošā pārveidotāja balansēšanas topoloģija.

Viena no transformatoru pārnese metodēm ir daudztinumu transformatora balansēšanas metode: transformatoram ir viens sekundārais tinums katram baterijas elementam vai elementu pārim [44], [45]. 3.7. attēlā redzama topoloģijas references versija, kurā pārveidotājs baro

transformatora primāro tinumu no pakas, savukārt sekundārie tinumi individuāli lādē katru elementu. Primārās puses pārveidotājs var būt realizēts dažādās spēka elektronikas topoloģijās [45], [46], [45], [47], [48]. Pārveidotājs var tikt barots arī no ārējā avotā, tādā gadījumā topoloģija kļūst par selektīvās lādēšanas paņēmieni. Tinumu realizācijai ir piedāvāta pat koaksiālo tinumu izmantošana, lai samazinātu parazitiskos elementus un atvieglotu ražošanu, tomēr transformatora sarežģītība parasti tiek atzīmēta kā šīs topoloģijas galvenais trūkums [21], [49].



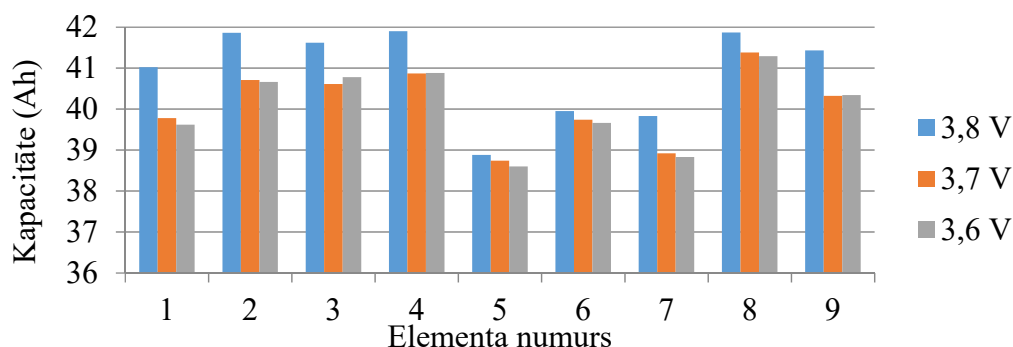
3.7. att. Daudztinumu transformatora balansēšanas references topoloģija.

Literatūras analīze norāda, ka izkliedējošā balansēšana ir neefektīva un no tās būtu jāizvairās [50], [51], [52]. Argumentācijai tiek izmantotas situācijas ar lielu uzlādes līmeņu atšķirību: līdz 0,5 V spriegumam [51] un 42 % uzlādes līmenim [53]. Praktiskās situācijās baterijas elementi tiek balansēti katrā lādēšanas procedūrā, līdz ar to spriegumu līmeņu atšķirības ir daudz mazākas [54]. Parasti elementi tiek balansēti pēc sprieguma, jo katra elementa kapacitātes un uzlādes līmeņa noteikšana ir krietni sarežģītāka, kā arī bateriju elementu ražotāji parasti jau nodrošina kapacitātes izkliedi, kas nav lielāka par 3 % [55]. Avots [54] demonstrē, ka līdz pat 500 cikliem uzlādes/izlādes efektivitāte daudelementu baterijai bez balansēšanas ķēdes ir tāda pati, kā ir baterijai ar balansēšanas ķēdi. Tas papildina secinājumu, ka šuntējošā rezistora balansēšanas metode ir piemērota arī modernām bateriju pakām.

Kopumā vairāku pakāpju balansēšanas risinājumi ir maz pētīti. Daži piedāvājumi ir doti [56] un [57], kur mazi *DC/DC* pārveidotāji ir izmantoti, lai balansētu elementus baterijas modulī, savukārt lielāks *DC/DC* pārveidotājs balansē visu paku (moduļus). Līdzīgs darbs ir aprakstīts [58] un [59], kur balansēšanas topoloģija balansē gan individuālus elementus, gan moduļus. Piedāvātais termins ir modularizēta balansēšana, jo baterija tiek sadalīta moduļos, un enerģija starp moduļiem tiek pārnesta ar speciālu ķēdi. Rezultātā tiek iegūta duālā balansēšana vai jauktā balansēšana, kurā katrai pakāpei tiek izmantota cita balansēšanas metode. Šādu paņēmieni izmantošana var efektīvi lietot, lai realizētu vairāku balansēšanas topoloģiju priekšrocības vienā bateriju pakā.

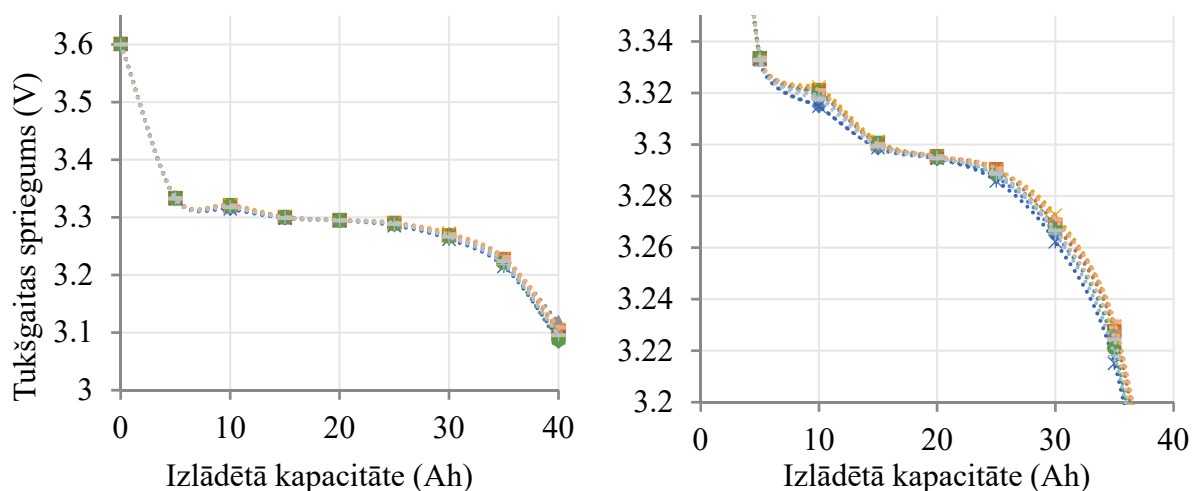
4. INDIVIDUĀLU GALVANISKO ELEMENTU TESTĒŠANA UN PĒTĪŠANA

Promocijas darba mērķis bija izstrādāt un realizēt bateriju paku un BPS mazam transportlīdzeklim, tāpēc pirmais eksperimentālais solis bija iegūt datus par individuāliem elementiem. Pirmajam testam tika mērīta deviņu LFP *WB-LYP40AHA* elementu kapacitāte (40 Ah nominālā) [60], [61]. Elementi tika uzlādēti līdz trim līmeņiem: 3,6 V, 3,7 V un 3,8 V. Rezultāti atspoguļoti 4.1. attēlā. Vidējā kapacitāte pie 3,8 V bija 40,93 Ah, pie 3,7 V – 40,12 Ah, pie 3,6 V – 40,07 Ah. Atšķirība starp 3,8 V un 3,6 V lādēšanu bija 2,08 %. Samazināts spriegums uzlabo elementu mūžu, tāpēc ir lietderīgi samazināt lādēšanas spriegumu.



4.1. att. Deviņu LFP elementu kapacitāte pie dažādiem lādēšanas spriegumiem.

Nākamajā testā tika mērīts šo pašu elementu tukšgaitas spriegums. Iegūtais grafiks redzams 4.2. attēlā. Pēc uzlādēšanas un relaksācijas pirmajā punktā (0 Ah) visi elementi bija ar $3,6 \text{ V} \pm 1 \text{ mV}$ spriegumu – labi sagrupēti. Tomēr pie 10 Ah un 25 Ah izlādes tika novērotas spriegumu atšķirības. Pie 10 Ah maksimālā atšķirība ir 7,4 mV, pie 25 Ah – 4,9 mV, pie 30 Ah – 10,4 mV, pie 35 Ah – 16,3 mV, pie 40 Ah – 33,7 mV. Iegūtais grafiks demonstrē, ka, ja balansēšana notiek lādēšanas beigās, tad ir relatīvi lielas izmaiņas elementa spriegumā uz katru ielādētā lādiņa vienību, līdz ar to nav nepieciešama ļoti augsta elementu sprieguma mērīšanas precizitāte.



4.2. att. Deviņu LFP elementu tukšgaitas spriegums. Pa kreisi: pilns diapazons. Pa labi: tikai centrālais agabals.

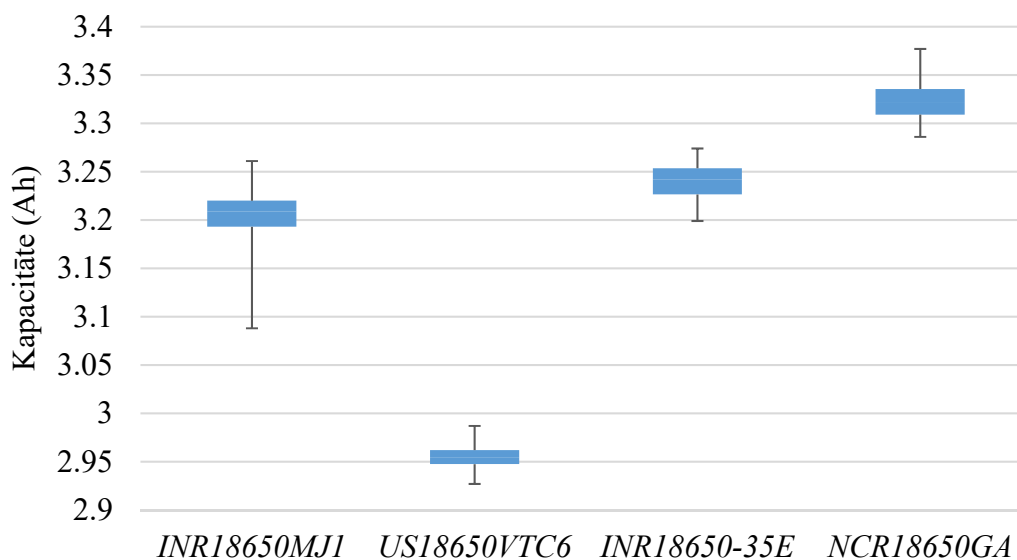
Četri 83 elementu komplekti ar 18650 izmēra elementiem tika iegādāti projekta ietvaros, lai izstrādātu pielāgojamu asistējošās piedziņas ratiņkrēslu. Iegādāto elementu pamatspecifikācija apkopota 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Testēto 18650 izmēra elementu pamatspecifikācija

Ražotājs	Modelis	C, Ah	Cikli	Izlādes strāva, A	Uzlādes strāva, A
Sony	US18650VTC6	3,13	500	20	3
LG Chem	INR18650MJI	3,5	400	10	1,7
Samsung SDI	INR18650-35E	3,35	500	8	1,7
Panasonic	NCR18650GA	3,3	300	10	1,475

Visu 332 elementu sākotnējā kapacitāte tika izmērīta, lai iegūtu informāciju par kapacitātes izkliedi viena komplekta (pirkuma) ietvaros. Tika izmantotas statistiskās metodes, lai analizētu iegūtos mērījumus. Modeļa *INR18650MJI* kapacitātes diapazons variē līdz 5 %, kas ir vairāk par 3 %, ko norāda ražotājs. Modeļa *US18650VTC6* kapacitātes diapazons variē līdz 2,03 %, *INR18650-35E* kapacitāte variē 2,31 % diapazonā, *NCR18650GA* kapacitātes vērtības variē 2,74 % diapazonā. Rezultāti ir demonstrēti kastveida un nogriežņu procentiņu diagrammā (4.3. att.). Rezultāti norāda, ka no visiem modeļiem, izņemot *INR18650MJI*, gadījuma secībā izvēloties elementus, to kapacitātes atšķirībām nevajadzētu būt lielākām par 3 %. Var prognozēt, ka šādā gadījumā šuntējošā rezistora balansēšana neradītu lielus enerģijas zudumus.



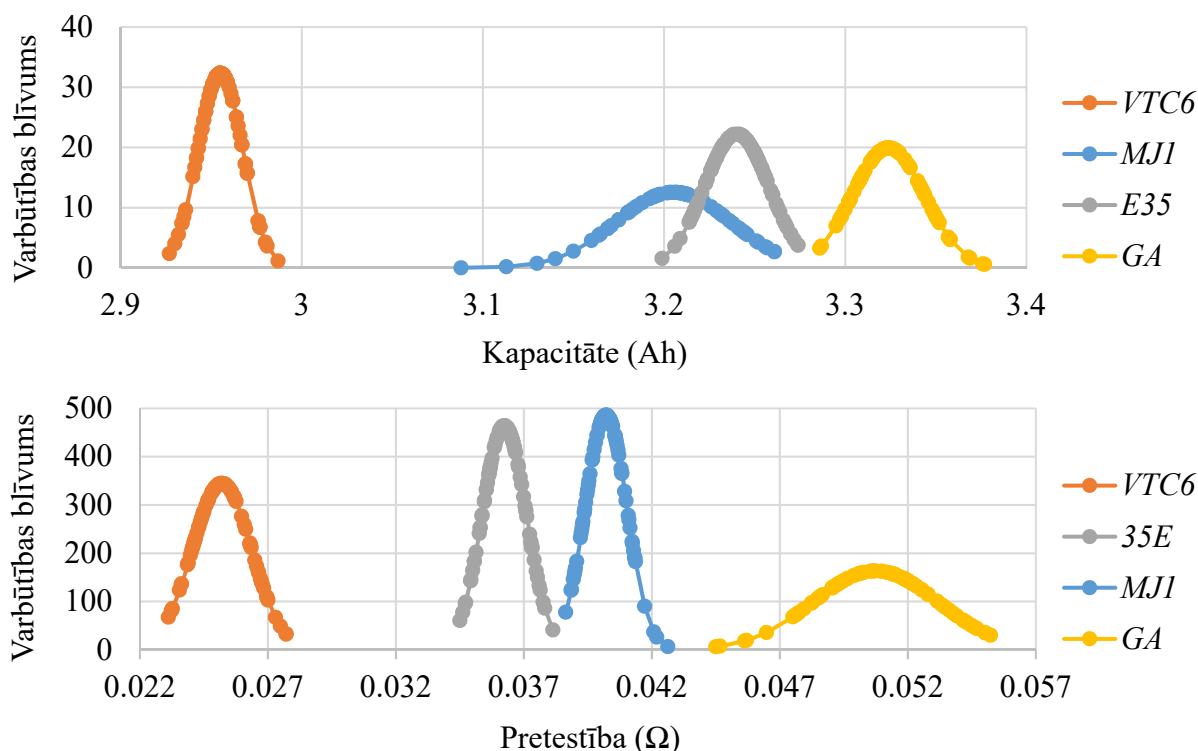
4.3. att. Četru elementu modeļu kapacitāšu salīdzinājums kastveida un nogriežņu procentiņu diagrammā.

Tika veikti papildu aprēķini, lai noskaidrotu, kāda būtu 28 elementu baterijas kapacitāte, ja elementu izvēlei tiktu izmantoti iegūtie mērījumi. *INR18650MJI* optimālā kapacitāte būtu 3,210 +/- 0,006 Ah (0,187 % izkliede). *US18650VTC6* optimālā kapacitāte būtu 2,955 +/- 0,004 Ah (0,135 % izkliede). *INR18650-35E* optimālā kapacitāte būtu 3,243 +/- 0,007 Ah (0,231 % izkliede). *NCR18650GA* optimālā kapacitāte būtu

3,323 +/- 0,006 Ah (0,181 % izkliede). Salīdzinot nejauši izvēlētu bateriju paku ar speciāli atlasītu, atšķirība kapacitātes izklienē var pārsniegt desmit reizes.

Vēl viens novērtējums ir iespējamība iegūt 28 elementu baterijas paku ar konkrētu elementu kapacitāte izklienē, elementus izvēloties nejauši. *US18650VTC6*, *INR18650-35E* un *NCR18650GA* kapacitātes atšķirības diapazons ir zem 3 %, savukārt iespējamība iegūt 3 % izklienē, izmantojot *INR18650MJI*, ir tikai 1,9 %. 2 % izklienē iespējamība ir 66,2 % *US18650VTC6* gadījumā, nav iespējamības *INR18650MJI* gadījumā, ir 18,5 % *INR18650-35E* gadījumā un 7,6 % *NCR18650GA* gadījumā. Šiem elementu modeļiem iespējamība iegūt bateriju paku ar elementu kapacitātes izklienē zem 1 % ir mazāka par 0,1 % vai pat tādas nav.

Kapacitātes mērījumi ir laikietilpīgs process, jo tam ir nepieciešama uzlāde (ap 2,5 stundām) un izlāde (ap 1 stundu) katram elementam. Cits elementu parametrs – pilnā pretestība – ir mērāms ātrāk. Tā tika mērīta pie četrām frekvencēm (1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1000 Hz) un trim uzlādes līmeņiem (100 %, ~ 70 %, ~ 30 %). Tika veikti statistiskie aprēķini: mediāna, vidējā vērtība, standartnovirze, paraugu dispersija, novirze no vidējā. Būtiski ir tas, ka tika iegūti kapacitātes un pilnās pretestības datu sadalījumi (4.4. att.). Pretestības mērījumi tika salīdzināti ar kapacitātes mērījumiem, lai noskaidrotu, vai starp abiem pastāv korelācija.



4.4. att. Pilnās pretestības sadalījums (augšējais grafiks) un kapacitātes sadalījums (apakšējais grafiks).

Tika aprēķināta tiešā korelācija starp kapacitāti un pilno pretestību katram modeļa elementam. Diviem modeļiem korelācija ir lielāka par 20 %. *INR18650MJI* korelācija ir 11 %, *NCR18650GA* – tikai 1 %. Aprēķinātā korelācija starp kapacitāti un pilno pretestību *US18650VTC6* un *INR18650-35E* gadījumā bija viduvēja, savukārt *INR18650MJI* un *NCR18650GA* gadījumā tā bija vāja. No tā var secināt, ka pilnās pretestības mērījumi tieši nevar aizvietot pilnvērtīgus kapacitātes mērījumus, lai veiktu elementu šķirošanu pēc kapacitātes.

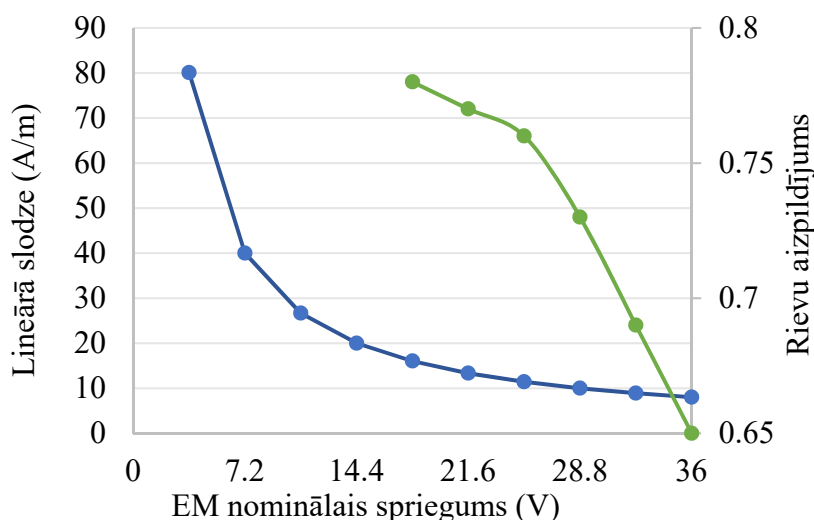
5. BATERIJAS KONFIGURĀCIJAS IZVEIDOŠANA INDIVIDUĀLĀS MOBILITĀTES TRANSPORTLĪDZEKLIM

Daļa no šī promocijas darba tika veltīta, lai izstrādātu 320 W bateriju paku individuālās mobilitātes transportlīdzeklī – elektriskajam ratiņkrēslam. Izstrādes procesā vispirms tika apkopota informācija par 34 komerciāli ražotiem ratiņkrēsliem – tika analizēts to enerģijas patēriņš un baterijas specifikācija. Secināts, ka 24 V 480 Wh baterija būtu jābūt pietiekamai, lai sasniegtu noteiktos mērķus. Tika apkopota un salīdzināta informācija par 115 litija jonu baterijām. Rezultātā tika nolemts izmantot 18650 izmēra bateriju elementus (4.1. tabula) ar vismaz 3 Ah kapacitāti, lai iegūtu saderību ar projektā definēto svaru un izmēru.

Baterijas elementi var tikt izkārtoti ierobežotā konfigurāciju skaitā. Kā redzams 5.1. vienādojumā, tā kreisā puse apraksta virknes slēgumu, labā puse – paralēlo slēgumu, vadītspējas zudumus neietekmē pati konfigurācija. Līdz ar to ir nepieciešams analizēt citus sistēmas zudumus, lai izvēlētos optimālo baterijas spriegumu un konfigurāciju.

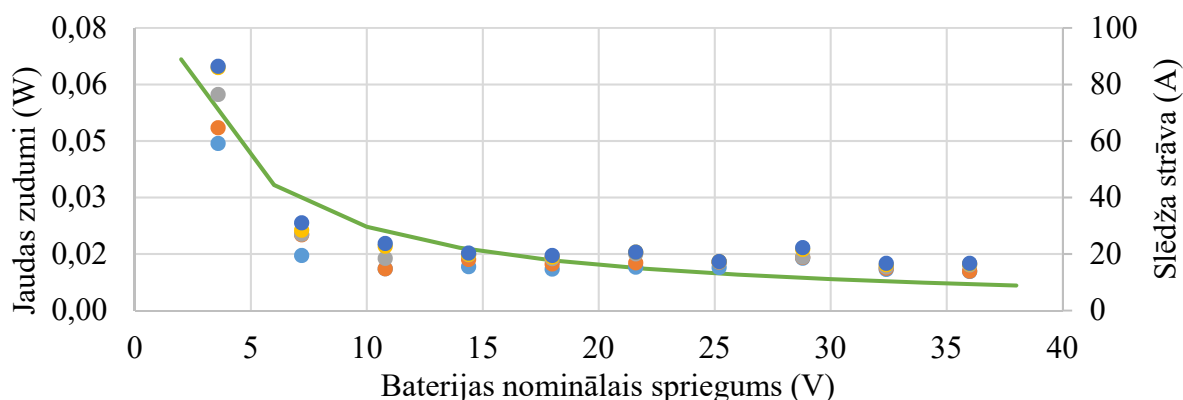
$$\frac{P_{batt}^2 \cdot R_{cell} \cdot n_{cell}}{U_{cell}^2 \cdot n_{cell}^2} = \frac{P_{batt}^2 \cdot R_{cell}}{U_{cell}^2 \cdot n_{cell}} \quad (5.1.)$$

Tika veikta dzinēja dizaina analīze, lai noskaidrotu vēlamo nominālo spriegumu. Tika analizēta dzinēja lineārā slodze un rievu aizpildījuma koeficients attiecībā pret nominālo spriegumu. Noskaidrots, ka dzinēju ir iespējams izveidot, ja nominālais spriegums ir 18 V–36 V diapazonā. 5.1. attēlā redzams, kā rievu aizpildījums ierobežo dzinēja dizainu.



5.1. att. Aprēķinātā lineārā slodze (zaļā līnija) un armatūras rievu aizpildījums (zilā līnija).

Tipiski dzinēja vadībai tiek lietots sprieguma avota invertors, kas tieši pieslēgts pie baterijas pakas. Baterijas pakas nominālais spriegums tieši ietekmē invertora parametrus, īpaši slēdžu (*MOSFET*) zudumus. Lai atrastu optimālo spriegumu, tie tika analizēti pie desmit iespējamajiem sprieguma līmeņiem. Rezultāti apkopoti 5.2. attēlā. Var secināt, ka, ja nominālais spriegums ir virs 7,2 V, baterijas spriegums būtiski neietekmē piedziņas pārveidotāja slēdžu zudumus. Līdzīgs secinājums ir iegūstams, ja tiek analizēti zudumi daudzpārveidotāju *SEPIC* veida bateriju lādētājam. Tranzistoru cenu analīze atklāja, ka zemākā cena ir spriegumu diapazonā 14,4 V – 32,4 V.



5.2. att. Aprēķinātie jaudas zudumi (punkti) un strāva (līnija) uz katru invertora slēdzi pie dažādiem baterijas nominālajiem spriegumiem.

Baterijas pakai minimāli būtu jābūt 25 elementiem, tomēr 28 elementi dod lielāku elastību. 5.1. tabulā apkopotas iespējamās konfigurācijas, ja minimālais elementu skaits ir 28 pie 3,6 V sprieguma. *9S4P* un *10S3P* konfigurāciju pilnais spriegums pārsniedz 36 V – drošības labad no šīm konfigurācijām vajadzētu izvairīties. Atliek *4S7P* un *7S4P* konfigurācijas. *4S7P* nav vēlama, jo 14,4 V nominālais spriegums nav piemērots dzinēja dizainam, kam ir nepieciešams spriegums, kas augstāks par 18 V. Labākā izvēle ir *7S4P* konfigurācija, jo spriegums ir relatīvi augsts (zema strāva), kā arī tranzistoru zudumi un cena ir relatīvi zema. *5S5P* – šī 25 elementu konfigurācija arī būtu pietiekama (uz robežas) dzinēja dizainam, taču tai trūktu iespējas izmantot citus elementus (ar mazāku kapacitāti), kā arī tā nebūtu savietojama ar vecākām sistēmām, kas izmanto 12 V svina skābes baterijas. Nobeidzot tika izlemts izmantot *7S4P* konfigurāciju, jo tā ir vispiemērotākā labā snieguma un dizaina elastības dēļ, tai gan ir arī trūkums – tiek izmantoti trīs papildu elementi.

5.1. tabula

Bateriju pakas parametri pie dažādām elementu konfigurācijām

Nominālais spriegums (V)	Pilnais spriegums (V)	Strāva (A)	Baterijas konfigurācija	Elementu skaits	Invertora zudumi	Lādētāja zudumi	MOSFET cena
3,6	4,2	88,9	<i>1S28P</i>	28	Augsti	Augsti	Augsti
7,2	8,4	44,4	<i>2S14P</i>	28	Vidēji	Vidēji	Vidēji
10,8	12,6	29,6	<i>3S10P</i>	30	Zemi	Vidēji	Vidēji
14,4	16,8	22,2	<i>4S7P</i>	28	Zemi	Zemi	Zemi
18	21	17,8	<i>5S6P</i>	30	Zemi	Zemi	Zemi
21,6	25,2	14,8	<i>6S5P</i>	30	Zemi	Vidēji	Vidēji
25,2	29,4	12,7	<i>7S4P</i>	28	Zemi	Zemi	Zemi
28,8	33,6	11,1	<i>8S4P</i>	32	Zemi	Vidēji	Vidēji
32,4	37,8	9,9	<i>9S4P</i>	36	Zemi	Zemi	Vidēji
36	42	8,9	<i>10S3P</i>	30	Zemi	Vidēji	Vidēji

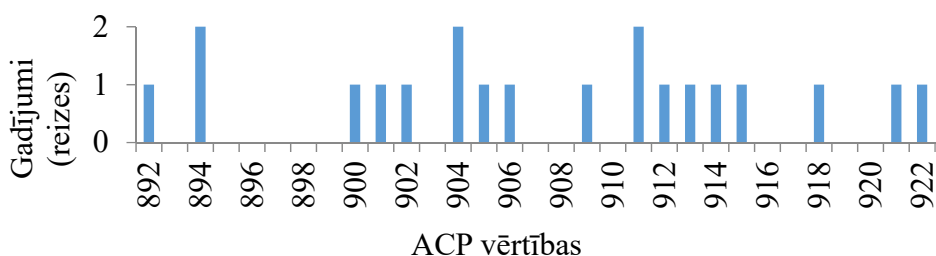
6. ELEMENTU BALANSĒŠANAS SISTĒMAS IZSTRĀDE UN PĀRBAUDE

Nozīmīgs promocijas darba mērķis bija izstrādāt balansēšanas sistēmu citam mazam transportlīdzeklim – elektriskajam kartingam, kas izmanto divas baterijas, katru veidotu no 40 Ah LFP elementiem. Sākotnēji tika realizēta šuntējošo rezistoru metode, kas vēlāk tika papildināta ar daudztinumu transformatora metodi, lai izveidotu jaunu vairāku pakāpju balansēšanas metodi. Balansēšanas sistēma tika veidota modulāra ar vienu vadošo kontrolleri.

Elementu moduļa izstrādei bija trīs iterācijas (6.3. att.), kuru laikā tika uzlabota shēma, plate kā arī programmatūra. Elementu moduļu plate tika izstrādāta tā, lai to varētu tieši pievienot uz izmantotā LFP elementa. Katrā iterācijā tika izmantota nedaudz cits veids šuntējošā rezistora realizācijai: rezistoru virkne, paaugstināts rezistors un, visbeidzot, rezistors ar caurumiem platē, lai uzlabotu termisko izolāciju. Aparatūra tika izstrādāta, lai varētu veikt ziedlapķēdes komunikāciju. Sākotnējā plate izmantoja optronu, lai izolētu komunikāciju līniju, taču gala versijā tika izmantots efektīvāks rezistoru dalītājs. Moduļa strāvas patēriņš tika samazināts no sākotnējās 2,9 mA vērtības līdz 0,9 mA.

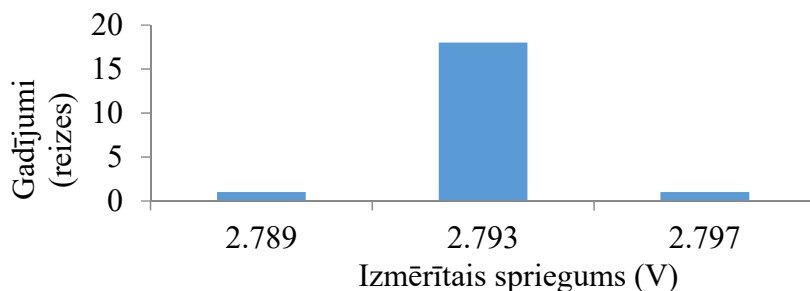
Moduļa programmu var iedalīt divās daļās. Pirmā daļa veic pamatdarbības, savukārt otrā – datu pārsūtīšanu, izmantojot *UART* komunikāciju. Pirmās daļas uzdevumi: darbināt ACP un iegūt elementa sprieguma un temperatūras mērījumus; sagatavot mērījumus sūtīšanai uz vadošo kontrolleri; izmantot mērījumus, lai veiktu balansēšanu.

Tika veiktas darbības, lai kalibrētu katra moduļa ACP. Sākotnējā 20 moduļu mērījumu precizitāte redzama 6.1. attēlā. Izkliede sasniedz 30 diskretās vērtības, kas atbilst 12 % kļūdai sprieguma mērījumam.

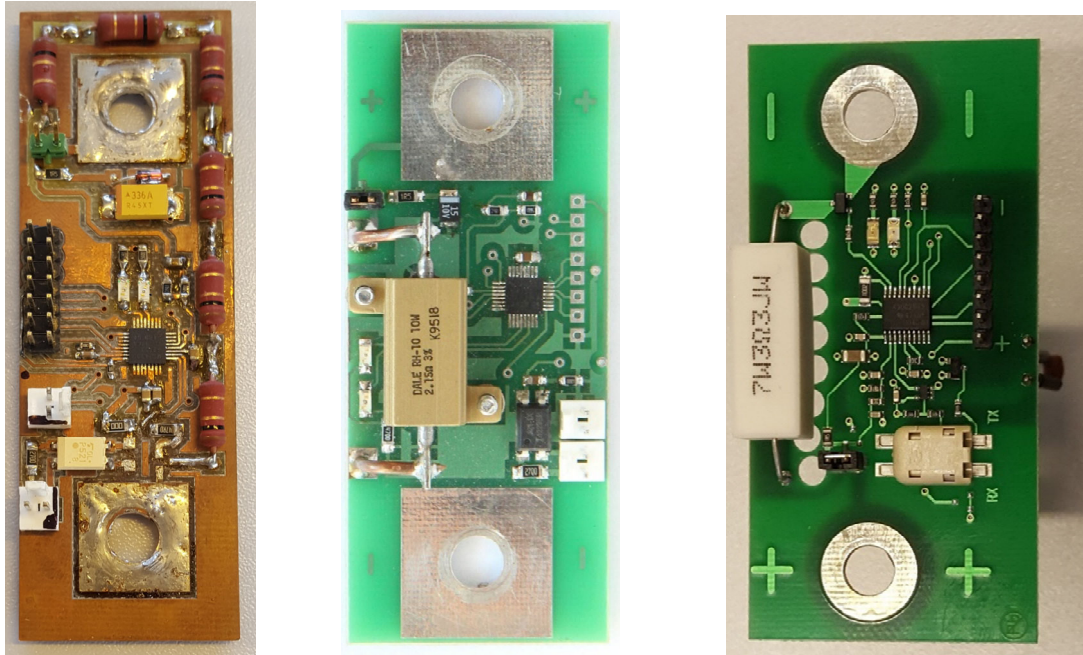


6.1. att. ACP mērījumu rezultāti no 20 elementu moduļiem.

Izmantojot slīpuma vienādošanas procedūru ar speciālu kalibrēšanas stendu, sprieguma mērīšanas rezultāts tika uzlabots līdz 0,8 % kļūdai (6.2. att.). Kalibrēšanas procedūra tika paplašināta, lai iekļautu arī temperatūras kalibrēšanu. Moduļa programmatūra tika papildināta ar īpašu kalibrēšanas apakšprogrammu, lai atvieglotu pašu procedūru.

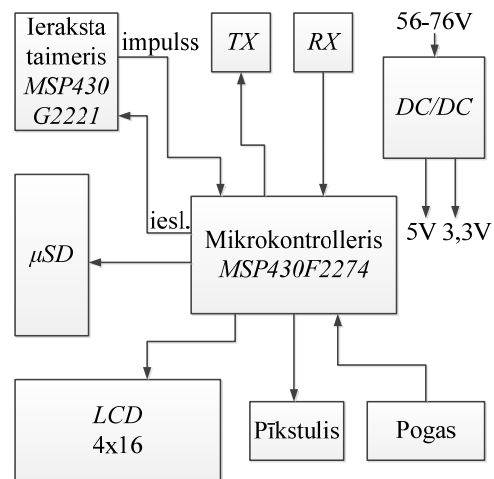


6.2. att. ACP mērījumu izkliede pēc katra moduļa ACP līknes slīpuma kompensēšanas.



6.3. att. Izveidotie elementu moduļi.

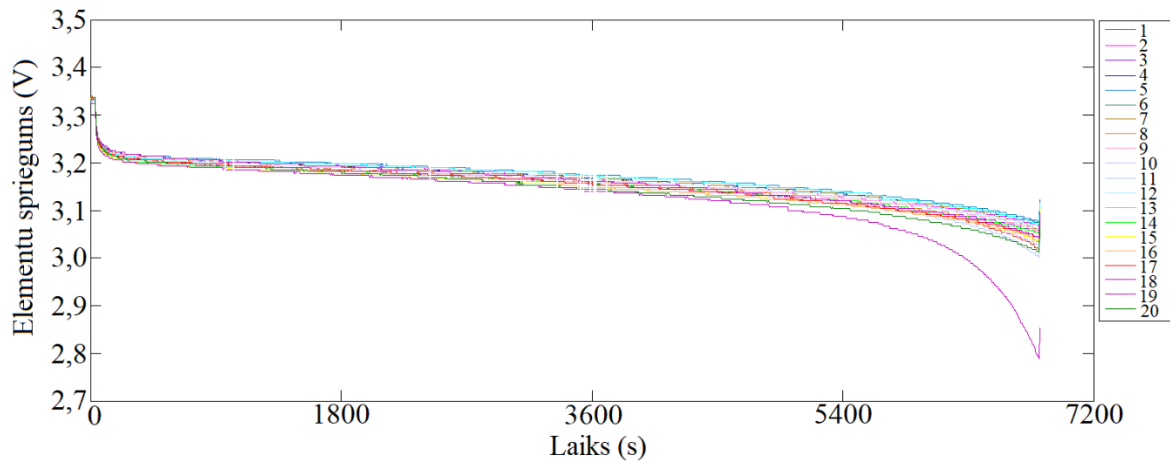
Lai pārbaudītu balansēšanas veiktspēju, tika izveidotas divas vadošā kontrolera versijas. Gala versija (6.4. att.) bija aprīkota ar *LCD*, kurā tika attēlotas sprieguma vērtības, kā arī ar mikro *SD* karti, kurā tika glabāti visi elementu mērījumi; jēldati tālāk tika apstrādāti ar *HxD editor* redaktoru un *Matlab*. Reālā laika pulkstenis tika izmantots, lai datu iegūšanu iesāktu precīzos laika intervālos, tādējādi dati bija izmantojami sprieguma grafiku izveidei.



6.4. att. BPS vadošais modulis.

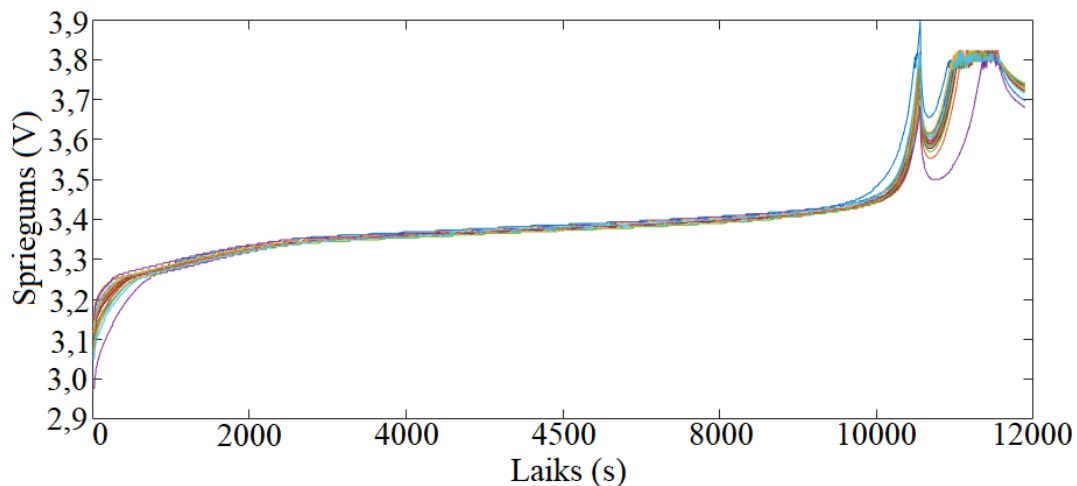
Izstrādātā balansēšanas sistēma tika testēta, izmantojot 20 elementu 40 Ah bateriju. Pirmajā testā paka tika izlādēta ar 20 A strāvu (0,5C). Izlāde tika pārtraukta, kad vadošais modulis fiksēja, ka kāds no elementiem ir sasniedzis 2,8 V līmeni. Iegūtais izlādes spriegumu grafiks redzams 6.5. attēlā. Ātri vien kļūst redzama spriegumu atšķirība, tomēr tikai pēdējā ceturtdaļā

19. elementa spriegums strauji samazinās, liecinot par zemāku kapacitāti vai sākotnējo uzlādes līmeni. Pēc strāvas izslēgšanas visi spriegumu lēcienveidīgi pieauga.



6.5. att. No BPS iegūtais elementu izlādes spriegumu grafiks.

Tālākā darba gaitā tukšā bateriju paka tika uzlādēta ar 11 A strāvu. 6.6. attēlā redzams iegūtais spriegumu grafiks. Ir redzams, ka lādēšanas beigu fāzē viens no elementiem sasniedz 3,9 V spriegumu, savukārt citu elementu spriegums ir ap 3,8 V. Šajā brīdī 11 A lādēšanas strāva ir lielāka par balansēšanas strāvu, un, lādēšanai turpinoties, dažu elementu spriegums pārsniedz 3,8 V spriegumu. Pēc 3,9 V sasniegšanas lādēšanas strāva tika samazināta līdz 1,5 A, un tā rezultātā samazinās visu elementu spriegums. Tomēr drīz pēc tam visu elementu spriegumi atkal sasniedza 3,8 V līmeni, pakai sasniedzot pilnu uzlādi.



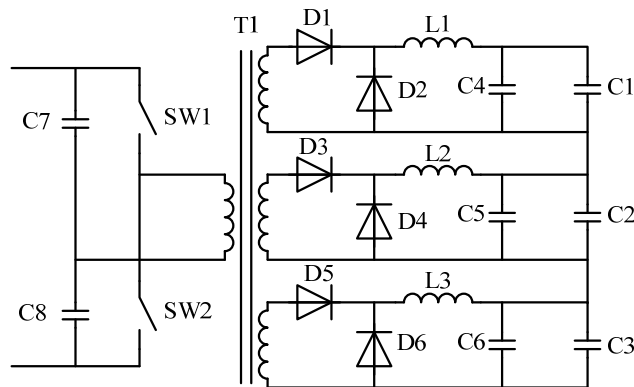
6.6. att. No BPS iegūtais elementu uzlādes spriegumu grafiks.

No iegūtajiem datiem tika aprēķināts, ka šīs LFP baterijas efektivitāte ir 93 %, mērot 10 uzlādes/izlādes ciklus. Apmēram 1,2 % tiek zaudēti, veicot šuntējošā rezistora balansēšanu. Var secināt, ka šajā situācijā izstrādātās balansēšanas sistēmas zudumi ir mazi, savukārt pati sistēma ir vienkārša un viegli lietojama modulārā risinājumā.

7. UZLABOTAS ELEMENTU BALANSĒŠANAS IZSTRĀDE

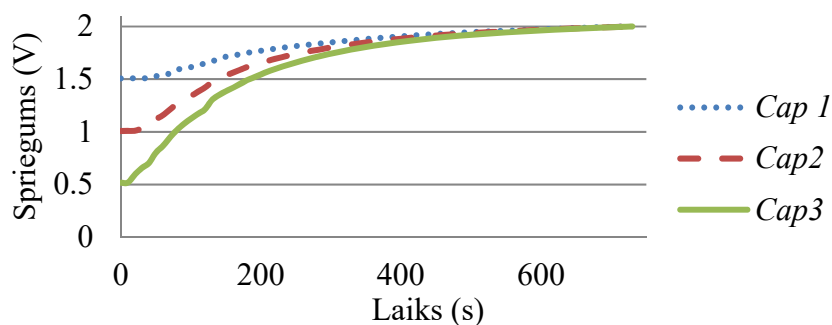
Šuntējošās balansēšanas trūkumus ir iespējams samazināt, ja elementi tiek sagrupēti un lādēti atsevišķi. Sagrupētos elementus var lādēt, izmantojot vienu vairāku sekundāro tinumu transformatoru – šis paņēmiens nodrošina dabisku lādēšanas strāvu sadalīšanu atbilstoši elementu grupu spriegumiem. Rezultātā tiek iegūta divpakāpju balansēšanas topoloģija.

Lai pārliecinātos par vairāku sekundāro tinumu transformatora darbību, tika nolemts izveidot un pārbaudīt trīs elementu lādēšanas shēmu ar 10 A lādēšanas strāvu un superkondensatoriem bateriju elementu vietā. Pustilta shēma tika izvēlēta primārajai pusei. Sekundārā puse tika aprīkota ar taisngriezi un LC filtru katram tinumam, kā redzams 7.1. attēlā. Ja aizpildījuma koeficients netiek mainīts, kondensatoru strāva ir inversi proporcionāla to spriegumam un līdz ar to – arī to uzlādes līmenim. Visi kondensatori ir vienā sistēmā, tāpēc kondensatoram ar viszemāko spriegumu būs vislielākā strāva. Šī efekta dēļ aprakstītā balansēšanas metode spēj veikt balansēšanu bez papildu atgriezeniskajām saitēm [62].



7.1. att. Trīs kondensatoru lādēšanas shēma ar vairāku sekundāro tinumu transformatoru.

Tika veikti trīs testi: ar vienādi izlādētiem kondensatoriem; ar vienu kondensatoru, kam ir dubulta kapacitāte; ar dažādiem sākuma spriegumiem. Pirmajā testā kondensatori uzlādējās līdz 30 mV atšķirībai. Otrajā testā sākotnējā 180 mV atšķirība tika samazināta līdz 58 mV. Trešajā testā tika veiksmīgi izlīdzināti sākotnējie spriegumi (1,5 V, 1,0 V un 0,5 V) (7.2. att.). Grafikā ir labi redzama dabiskā balansēšana – visi kondensatori gala spriegumu sasniedz vienlaikus. Var secināt, ka šī shēma ir piemērota augstākajai pakāpei izstrādātajā jauktajā vairāku pakāpju topoloģijā.

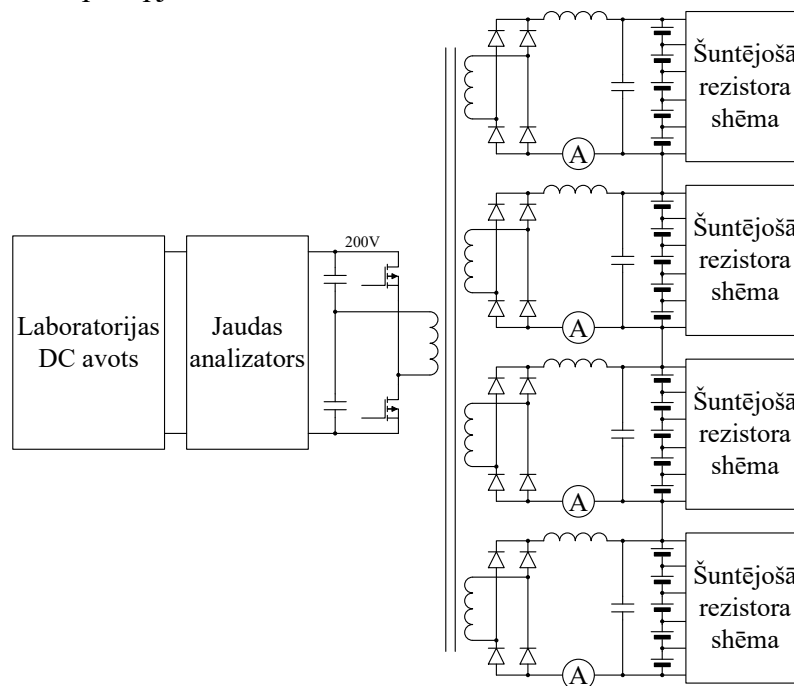


7.2. att. Kondensatoru lādēšana ar dažādiem sākuma spriegumiem.

Pirms jauktās divpakāpju balansēšanas sistēmas testēšanas tika veikta šuntējošās balansēšanas sistēmas testēšana līdzvērtīgos apstākļos. Uzņēmuma *N4L* jaudas analizators *PPA5530* tika izmantots, lai izmērītu baterijas enerģijas plūsmu. Kopējā izlādētā enerģija bija 2,45 kWh jeb 38,7 Ah. Pēc tam, izmantojot pustilta pārveidotāju, baterija tika uzlādēta ar 10 A strāvu. Izlādei tika patērēta 3,01 kWh. Šajā apjomā netika ņemts vērā vadības ķēžu patēriņš. Līdz ar to sistēmas enerģijas efektivitāte bija 81,4 %.

Līdzīgs efektivitātes tests tika veikts ar jaukto divpakāpju balansēšanas topoloģiju. Četri sekundārie tinumi tika pievienoti pie apakšpakām: katri pieci elementi veidoja vienu apakšpakā. Sistēmas shēma redzama 7.3. attēlā. Lai izmērītu efektivitāti, tika izmērīta gan izlādes, gan uzlādes enerģija.

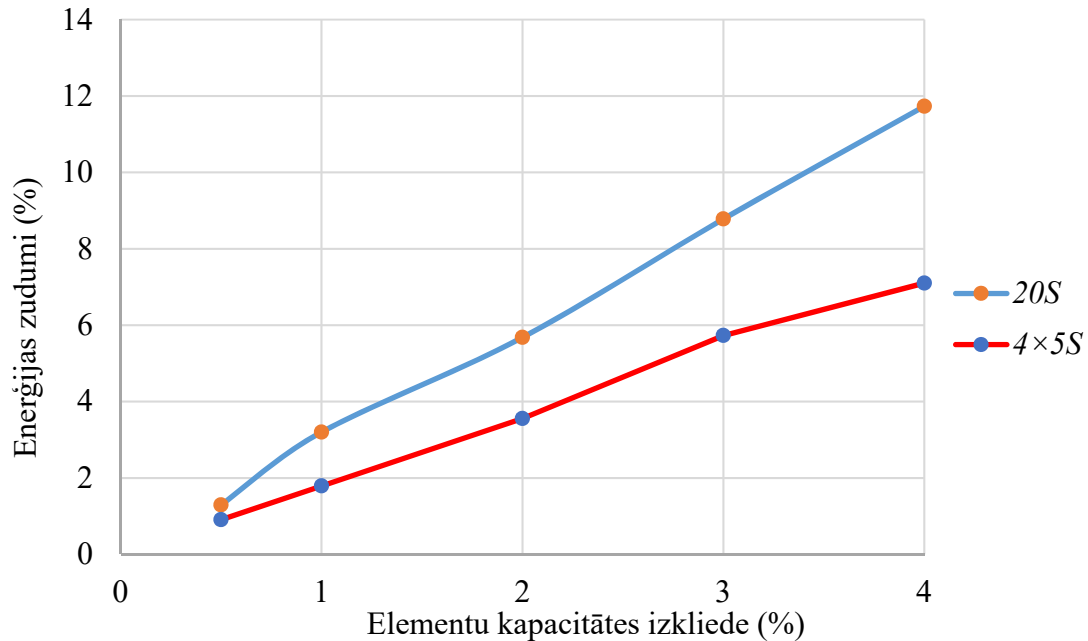
Eksperimentāli tika iegūti šādi rezultāti: pilnai uzlādei bija nepieciešamas 3,09 kWh, process ilga četras stundas un 38 minūtes; izlādes laikā tika izlādētas 2,43 kWh, process ilga trīs stundas un 50 minūtes. Izlādes laikā tika izmērīta arī apmērstundu kapacitāte, un tā bija 38,34 Ah. No abiem mērījumiem tika aprēķināta enerģijas efektivitāte baterijas pakai ar lādētāju un jauktu divpakāpju balansēšanu: 78,6 %.



7.3. att. Integrētā lādētāja un jauktās divpakāpju balansēšanas topoloģijas testēšanas shēma.

Var secināt, ka izmantojot izstrādāto jauktās balansēšanas metodi var veiksmīgi lietot daudztinumu transformatoru, lai balansētu augstāko pakāpi, kamēr zemāko pakāpi balansē šuntējošā rezistora topoloģija. Tomēr, kā liecina veiktie eksperimenti, vispārējā sistēmas efektivitāte bija 78,6 %. Turklāt, izmantojot tikai šuntējošā rezistora metodi, tika sasniegta 81,4 % efektivitāte. Shēmā iekļautie papildu tinumi un taisngrieži samazināja pārveidotāja efektivitāti, līdz ar to samazinot visas sistēmas enerģijas efektivitāti. Raugoties no citas perspektīvas, enerģijas efektivitātei vajadzētu pieaugt, jo šuntējošo rezistoru balansēšana tika dalīta. Baterijas elementi tika dalīti četrās apakšpakās, un šuntējošās balansēšanas zudumiem būtu jāsamazinās, ja apakšpakas balansējamo elementu skaits ir mazāks. Ja veic aprēķinus ar

nejauši ģenerētām elementu kapacitātēm līdzvērtīgai pakai, kas ir sadalīta četrās apakšpakās, tad balansēšanas zudumi samazinās atbilstoši 7.4. attēlā redzamajai līknei $4 \times 5S$ (četrus apakšpakas virknes slēgums, kur katra apakšpakas ietver piecus virknē slēgtus elementus). Var secināt, ka bateriju pakas ar augstāku elementu kapacitātes variāciju iegūst lielāku uzlabojumu, izmantojot jauktās balansēšanas topoloģiju.



7.4. att. Baterijas enerģijas zudumi tikai ar šuntējošo rezistoru balansēšanu ($20S$) un dalītu šuntējošo rezistoru balansēšanu ($4 \times 5S$).

Ja iegūtais dalītās šuntējošās balansēšanas zudumu samazinājums ir lielāks par vairāku sekundāro tinumu transformatora papildu zudumiem (7.1.), tad jauktā divpakāpju balansēšanas sniegs efektivitātes pieaugumu attiecībā pret tradicionālo šuntējošo rezistoru balansēšanu.

$$E_{MST} < E_{SR_full} - E_{SR_split}, \quad (7.1.)$$

kur: E_{MST} – vairāku sekundāro tinumu transformatora topoloģijas enerģijas zudumi, Wh;
 E_{SR_full} – tradicionālās šuntējošās balansēšanas topoloģijas enerģijas zudumi, Wh;
 E_{SR_split} – dalītās šuntējošās balansēšanas topoloģijas enerģijas zudumi, Wh.

Bateriju sadalot vairāk apakšpakās, enerģijas zudumi E_{SR_split} samazināsies, vairāku sekundāro tinumu transformatora priekšrocības uzlabosies. E_{SR_split} vērtība samazinās līdz 0, ja katram elementam tiek izmantots atsevišķs tinums – šuntējošā rezistora slānis zaudē savu nozīmi. Tomēr var būt apgrūtināti sasniegt pietiekami zemu E_{MST} vērtību, jo vairāku sekundāro tinumu transformatora topoloģijas zudumi rodas visā lādēšanas procesā, pretstatā šuntējošā rezistora topoloģijai, kas rada zudumus tikai pēc tam, kad pirmais elements ir sasniedzis pilnu spriegumu. Vairāku sekundāro tinumu transformatora topoloģija būtu jāoptimizē, lai sasniegtu minimālus zudumus pie maksimāla transformatora lietojuma, tādējādi ļaujot veiksmīgi izmantot jaukto divpakāpju balansēšanu.

SECINĀJUMI

Lai sasniegtu noteiktos mērķus, darba ievaddaļā analizētas dažādu elektrisko transportlīdzekļu bateriju sistēmas. No pieejamā materiāla tika secināts, ka piedziņas sistēmas spriegums saskan ar baterijas spriegumu. Atsevišķos gadījumos bija iespējama vienkāršota BPS analīze, izmantojot BPS fotoattēlus – visos apskatītajos gadījumos balansēšanai tika izmantota šuntējošā rezistora balansēšanas metode.

Tika veikta BPS un balansēšanas metožu zinātniskās literatūras analīze. Tika piedāvāta jauna balansēšanas metožu klasifikācija ar trim galvenajām grupām: izklīdzējošā grupa; selektīvās lādēšanas/izlādēšanas grupa; lādiņa pārnese grupa. Pirmā gūtā atziņa par balansēšanas metodēm bija šādā: izklīdzējošās metodes (piemēram, šuntējošā rezistora metode) tiek uzskatītas par neefektīvām un līdz ar to no tām vajadzētu izvairīties, lai gan šim argumentam netika dots reālos bateriju parametrus balstīts pamatojums. Otrā atziņa: literatūrā netika konstatētas jauktās vairāku pakāpju balansēšanas metodes.

Tika veikta eksperimentāla litija jonu bateriju veiktspējas analīze. Kapacitātes analīze atklāja, ka ir iespējams sasniegt augstu sākotnējo elementu kapacitāte līdzību (atšķirība mazāka par 0,2 %), ja elementi tiek šķirti atbilstoši izmēritajai kapacitātei. Kapacitātes mērījums ir laikietilpīgs process, lai gan to daļēji var aizvietot, izmantojot daudz ātrāk veicamu pilnās pretestības mērījumu, kas daļēji korelē ar kapacitāti.

Tika izstrādāti šuntējošā rezistora balansēšanas moduļi 40 Ah LFP elementiem. Iegultajā balansēšanas sistēma tika izstrādāta un integrēta mērījumu kalibrēšanas procedūra. Izstrādātā pārvaldības sistēma tika pārbaudīta ar 20 elementu LFP bateriju paku. Pēc pilnas izlādes tika veikta uzlāde, kas ilga 240 minūtes, no kurām tikai 16 minūtes, tātad – relatīvi īsu periodu, tika veikta balansēšana. Vēlāka elementu spriegumu analīze atklāja, ka tikai viens no baterijas elementiem ir lielā mērā atbildīgs par balansēšanas ilgumu. Balansēšanas laiks varētu būt vēl īsāks, ja elementi būtu atlasīti pirms baterijas pakas salikšanas.

Vairāku sekundāro tinumu transformatora balansēšanas metode ir eksperimentāli pārbaudīta, izmantojot trīs superkondensatoru paku. Tālākā darba gaitā pustilta transformatora topoloģija ar četriem sekundārajiem tinumiem tika izmantota, lai pārbaudītu jauktās divpakāpju balansēšanas topoloģijas sniegumu. 20 elementu LFP baterija tika sadalīta četrās apakšpakās ar šuntējošā rezistora balansēšanas moduļiem apakšējā pakāpē. Izmērītā sistēmas enerģijas efektivitāte bija 78,6 %, taču iepriekš izmērītā tikai šuntējošā rezistora balansēšanas efektivitāte bija 81,4 %. Secinājums: divu balansēšanas metožu kombinācija neuzlabo enerģijas efektivitāti pie konkrētajiem baterijas elementu parametriem. Definētā hipotēze ir patiesa, ja dalītās šuntējošās rezistoru balansēšanas zudumu samazinājums ir lielāks par papildu zudumiem, kas rodas, ieviešot vairāku sekundāro tinumu transformatoru pakāpi.

Tālākais darbs ietver turpmākus pētījumus bateriju lietojuma un bateriju pārvaldības sistēmu sfērā. Izstrādātā pārvaldības sistēma un 40 Ah LFP baterija tiks izmantota kā daļa no vairāku dzinēju elektriskā kartinga mācību platformas. Ir plānots izstrādāt bateriju pakas arī citiem individuālās mobilitātes transportlīdzekļiem. Vēl viens turpmākais pētniecība virziens ir saistīts ar elementu parametru mērīšanas sistēmām, proti, noskaidrot, kā mainās elementu parametri, tiem novecojot. Iegūtie statistiskie dati tiks izmantoti, lai izstrādātu modelī balstītu atlikušās enerģijas un “veselības” noteicēju, ko varētu lietot tālākajās pārvaldības sistēmās.

LITERATŪRA

- [1] CSDD, “Statistics of registered vehicle.” [Online]. Available: <https://www.csdd.lv/en/vehicles/statistics-of-registered-vehicle>.
- [2] “A European Green Deal | European Commission.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en. [Accessed: 29-Oct-2021].
- [3] N. Smith, “Beyond Energy: The Main Offenders [Climate Change Energy],” *Eng. Technol.*, vol. 15, no. 10, pp. 30–33, Nov. 2020.
- [4] “Electric Race Car Design & Engineering – Drive eO.” [Online]. Available: <https://driveeo.com/>. [Accessed: 01-Nov-2021].
- [5] “Electric Racing Karts – Blue Shock Race Electric karts.” [Online]. Available: <https://blueshockrace.com/electric-racing-karts/>. [Accessed: 01-Nov-2021].
- [6] “e-up! for everyone – new generation of the electric e-up! with a long range to be launched at a low price | Volkswagen Newsroom.” [Online]. Available: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/e-up-for-everyone-new-generation-of-the-electric-e-up-with-a-long-range-to-be-launched-at-a-low-price-5318>. [Accessed: 27-Jun-2020].
- [7] “2018 Nissan Leaf battery technology, a deep dive.” [Online]. Available: https://www.greencarreports.com/news/1117928_2018-nissan-leaf-battery-technology-a-deep-dive. [Accessed: 27-Jun-2020].
- [8] “BMS and contactor box – AEVA Forums.” [Online]. Available: <https://forums.aeva.asn.au/viewtopic.php?t=4278>. [Accessed: 27-Jun-2020].
- [9] “Bmw i3 bms | DIY Electric Car Forums.” [Online]. Available: <https://www.diyelectriccar.com/threads/bmw-i3-bms.198547/>. [Accessed: 01-Jul-2020].
- [10] “BMW i3 electric car battery balancing circuit (BMS) – Imgur.” [Online]. Available: <https://imgur.com/gallery/wdk7o/comment/1046244385>. [Accessed: 01-Jul-2020].
- [11] “Pics/Info: Inside the battery pack | Page 14 | Tesla Motors Club.” [Online]. Available: <https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/pics-info-inside-the-battery-pack.34934/page-14#post-755546>. [Accessed: 27-Jun-2020].
- [12] “Tesla BMS Module – Front.jpg (6798×3415).” [Online]. Available: <http://files.wizkid057.com/teslapack/update2/Tesla BMS Module – Front.jpg>. [Accessed: 27-Jun-2020].
- [13] I. Tsiropoulos, D. Tarvydas, and N. Lebedeva, “Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications,” 2018.
- [14] “Batteries for EBikes – EbikeMarketplace.” [Online]. Available: <https://ebikemarketplace.com/collections/lithium-batteries>. [Accessed: 18-Aug-2020].
- [15] “The Battery Doctor – YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/channel/UCxgrR15ORCLx7JI2MKqnmWw/videos>. [Accessed: 21-Aug-2020].
- [16] “Lithium-ion Battery Market Size and Share | Industry Analysis by 2027.” [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/lithium-ion-battery-market>. [Accessed: 19-Nov-2020].
- [17] “A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices | BloombergNEF.” [Online].

Available: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>. [Accessed: 04-Dec-2020].

- [18] “Lithium Ion Batteries Technical Handbook Japanese / International English,” vol. June. Panasonic, 2007.
- [19] W. Xie *et al.*, “Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries,” *J. Energy Storage*, vol. 32, no. August, p. 101837, Dec. 2020.
- [20] S. Gantenbein, M. Schönleber, M. Weiss, and E. Ivers-Tiffée, “Capacity Fade in Lithium-Ion Batteries and Cyclic Aging over Various State-of-Charge Ranges,” *Sustainability*, vol. 11, no. 23, p. 6697, Nov. 2019.
- [21] S. Moore and P. Schneider, “A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems,” in *SAE World Congress*, 2001, p. Doc. 2001-01-0959.
- [22] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, “Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation,” in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, vol. 6, no. 7, pp. 1–7.
- [23] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanés-Montero, and M. A. Guerrero-Martinez, “Battery equalization active methods,” *J. Power Sources*, vol. 246, pp. 934–949, 2014.
- [24] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanés-Montero, and M. a. Guerrero-Martinez, “Battery Equalization Control Based on the Shunt Transistor Method,” *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 7, no. 1, 2014.
- [25] W. C. Lee, D. Drury, and P. Mellor, “Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries,” in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011*, 2011.
- [26] J. Gallardo-Lozano, A. Lateef, E. Romero-Cadaval, and M. I. Milanés-Montero, “Active Battery Balancing for Battery Packs,” *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 40–46, 2013.
- [27] J. Gallardo-lozano and E. Romero-cadaval, “A Battery Cell Balancing Method with Linear Mode Bypass Current Control,” in *2014 14th Biennial Baltic Electronic Conference (BEC)*, 2014, pp. 245–248.
- [28] J. Cao, N. Schofield, and A. Emadi, “Battery balancing methods: A comprehensive review,” in *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008*, 2008, pp. 3–8.
- [29] J. D. Welsh, “A Comparison of Active and Passive Cell Balancing Techniques for Series / Parallel Battery Packs,” Ohio State University, 2009.
- [30] E. Chatzinikolaou and D. J. Rogers, “Cell SoC Balancing Using a Cascaded Full-Bridge Multilevel Converter in Battery Energy Storage Systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 9, pp. 5394–5402, Sep. 2016.
- [31] C. M. Young, N. Y. Chu, L. R. Chen, Y. C. Hsiao, and C. Z. Li, “A Single-phase multilevel inverter with battery balancing,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 5, pp. 1972–1978, 2013.
- [32] S. D’Arco, L. Piegari, and P. Tricoli, “A modular converter with embedded battery cell balancing for electric vehicles,” in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, ESARS*, 2012.

- [33] F. Altaf, L. Johannesson, and B. Egardt, "Performance evaluation of Multilevel Converter based cell balancer with reciprocating air flow," in *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2012*, 2012, pp. 706–713.
- [34] A. Gholizad and M. Farsadi, "A Novel State-of-Charge Balancing Method Using Improved Staircase Modulation of Multilevel Inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 10, pp. 6107–6114, Oct. 2016.
- [35] Z. Nie and C. Mi, "Fast battery equalization with isolated bidirectional DC-DC converter for PHEV applications," in *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, 2009, pp. 78–81.
- [36] D. B. W. Abeywardana, M. a M. Manaz, M. G. C. P. Mediwaththe, and K. M. Liyanage, "Improved shared transformer cell balancing of Li-ion batteries," in *2012 IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2012*, 2012.
- [37] Y. Barsukov, "Battery cell balancing: what to balance and how," *Texas Instruments*, 2005. [Online]. Available: [http://focus.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic 2 – Battery Cell Balancing – What to Balance and How.pdf](http://focus.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic_2_-_Battery_Cell_Balancing_-_What_to_Balance_and_How.pdf). [Accessed: 01-Jan-2015].
- [38] C. Pascual and P. T. Krein, "Switched capacitor system for automatic series battery equalization," in *Proceedings of APEC 97 – Applied Power Electronics Conference*, 1997, vol. 2, no. c, pp. 848–854.
- [39] M. Y. Kim, C. H. Kim, J. H. Kim, D. Y. Kim, and G. W. Moon, "Switched capacitor with chain structure for cell-balancing of lithium-ion batteries," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2012, pp. 2994–2999.
- [40] T. H. Phung, J.-C. Crebier, A. Chureau, A. Collet, and V. Nguyen, "Optimized structure for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells," in *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2011, vol. 29, no. 9, pp. 1374–1381.
- [41] D. Lewis, "Bidirectional current pump for battery charge balancing," US5631534, 1997.
- [42] N. H. Kutkut and D. M. Divan, "Dynamic equalization techniques for series battery stacks," in *International Telecommunications Energy Conference*, 1996, pp. 514–521.
- [43] J. Moran, "PowerPump™ Balancing," 2011.
- [44] R. H. Park, "Method of equalizing the voltages of the individual cells of storage batteries," US4331911, 1982.
- [45] H. L. W. Deepakraj M. Divan, Nasser H. Kutkut, Donald W. Novotny, "Battery charging using a transformer with a single primary winding and plural secondary windings.pdf," 5659237, 1997.
- [46] N. H. Kutkut, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Charge Equalization for Series Connected Battery Strings," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 3, pp. 562–568, 1995.
- [47] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 1, pp. 28–35, 1999.
- [48] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system," in *Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC'95*, 1995, vol. 35, no. 1, pp. 96–103.
- [49] M. Daowd, N. Omar, P. van den Bossche, and J. van Mierlo, "A review of passive and

- active battery balancing based on MATLAB/Simulink,” *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 2974–2989, 2011.
- [50] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, and R. Saletti, “High-efficiency digitally controlled charge equalizer for series-connected cells based on switching converter and super-capacitor,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 1139–1147, 2013.
- [51] T. H. Phung, A. Collet, and J. C. Crebier, “An optimized topology for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4603–4613, 2014.
- [52] M. Uno and A. Kukita, “Single-Switch Single-Transformer Cell Voltage Equalizer Based on Forward-Flyback Resonant Inverter and Voltage Multiplier for Series-Connected Energy Storage Cells,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 4232–4247, Nov. 2014.
- [53] A. M. Imtiaz and F. H. Khan, “‘Time shared flyback converter’ based regenerative cell balancing technique for series connected li-ion battery strings,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5960–5975, 2013.
- [54] B. T. Kuhn, G. E. Pitel, and P. T. Krein, “Electrical properties and equalization of lithium-ion cells in automotive applications,” in *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2005*, vol. 2005, pp. 55–59.
- [55] Samsung, “INR18650-35E.” Samsung SDI, 2015.
- [56] H. S. Park, C. E. Kim, G. W. Moon, J. H. Lee, and J. K. Oh, “Two-stage cell balancing scheme for hybrid electric vehicle lithium-ion battery strings,” in *PESC Record – IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2007*, pp. 273–279.
- [57] C. H. Kim, M. Y. Kim, H. S. Park, and G. W. Moon, “A modularized two-stage charge equalizer with cell selection switches for series-connected lithium-ion battery string in an HEV,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 8, pp. 3764–3774, 2012.
- [58] Hong-Sun Park, Chol-Ho Kim, Ki-Bum Park, Gun-Woo Moon, and Joong-Hui Lee, “Design of a Charge Equalizer Based on Battery Modularization,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3216–3223, Sep. 2009.
- [59] H. S. Park, C. H. Kim, and G. W. Moon, “Charge equalizer design method based on battery modularization,” in *2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2008, 2008*, pp. 558–563.
- [60] “(No Title).” [Online]. Available: <https://shop.gwl.eu/docs/pdf/Winston-OperatorManual.pdf>. [Accessed: 17-Dec-2020].
- [61] “Shenzhen Smart Lion Power Battery Limited.” [Online]. Available: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp40aha?category_id=182. [Accessed: 10-Dec-2020].
- [62] C. H. Kim, M. Y. Kim, and G. W. Moon, “A modularized charge equalizer using a battery monitoring ic for series-connected li-ion battery strings in electric vehicles,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3779–3787, 2013.



Kristaps Vītols dzimis 1986. gadā Valmierā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu (2008) un maģistra grādu (2010) elektrozinātnē. Kopš 2008. gada strādā RTU Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūtā, ieņemot laboratorijas vadītāja un pētnieka amatu. Zinātniskās intereses saistītas ar energoelektroniku, baterijām un to tehnoloģijām.