

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Mechanikos inžinerijos katedra

**LIČIO GELEŽIES FOSFATO BATERIJŲ
IŠKROVIMO PROCESO TYRIMAS**

Magistrinis baigiamasis darbas

Autorius: TMTV-10 gr. stud. Aleksej Pečko

Vadovė: Doc. dr. Violeta Bulbenkienė

Klaipėda, 2012

ANOTACIJA

Darbe yra pateikti ličio geležies fosfato baterijų iškrovimo prie įvairių temperatūrų proceso tyrimai. Išanalizuotos įvairių rūšių baterijos ir nustatytos tinkamiausios baterijos panaudojimui elektra varomame transporte. Mokslinių straipsnių analizė, leido nustatyti ličio geležies fosfato baterijų trūkumus ir pranašumus bei išanalizuoti jų savybes ir ypatumus. Suprojektuotas eksperimentinių tyrimo stendas, pateikta tyrimo metodika ir atlikti ličio geležies fosfato baterijų iškrovimo prie skirtingų temperatūrų tyrimai. Išanalizuoti eksperimentinių tyrimų rezultatai, pateiktos išvados ir rekomendacijos.

Pečko A. Ličio geležies fosfato baterijų iškrovimo proceso tyrimas. Technologijų valdymo magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovė Doc. dr. V. Bulbenkienė, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2012. – 80 p.

Raktažodžiai: LiFePO_4 , ličio geležies fosfatas, iškrovimas prie žemos temperatūros. elektra varomas transportas, elektromobilis, 100 Ah baterija, baterijų iškrovimo tyrimai

ANNOTATION

In this work a research of lithium iron phosphate batteries discharge process at different temperatures has been carried out. Different types of batteries have been analyzed and the most suitable battery type for electric transport is chosen. Scientific publication analysis allowed to identify the limitations of lithium iron phosphate batteries and to analyze the characteristics and peculiarities of this battery type. A battery testing stand has been designed, a research methodology has been presented and discharge tests of lithium iron phosphate batteries at normal and low temperatures have been performed. The results have been analyzed and findings together with recommendations have been presented.

Pecko A. Lithium Iron Phosphate Batteries Discharge Research. Technology management study programme master thesis. Supervisor Doc. dr. V. Bulbenkiene, Klaipeda University: Klaipeda, 2012. – 80 p.

Keywords: LiFePO_4 , lithium iron phosphate, discharge at low temperature, EV, electric car, 100 Ah battery, battery discharge research.

TURINYS

I. BATERIJŲ NAUDOJAMŲ ELEKTRA VAROMAME TRANSPORTE ANALIZĖ	11
1.1. Baterijų tipų analizė.....	12
1.2. Ličio jonų baterijų palyginimas	14
II. MOKSLINIŲ STRAIPSNIŲ ANALIZĖ	16
2.1. LiFePO ₄ struktūra	16
2.2. LiFePO ₄ darbinės temperatūros diapazonas.....	17
2.3. LiFePO ₄ baterijų formos.....	21
2.4. Didelės talpos LiFePO ₄ baterijos.....	24
2.5. LiFePO ₄ baterijų pakrovimas ir iškrovimas.....	25
2.6. LiFePO ₄ baterijų apsaugos grandinė.....	26
2.7. Skyriaus apibendrinimas.....	27
III. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	28
3.1. Baterijų parinkimas.....	28
3.2. Tyrimo objektas.....	29
3.3. Eksperimentinių tyrimų metodika	33
3.4. Eksperimentinių tyrimų įrenginiai ir priemonės	33
3.5. Priemonių analizė ir parinkimas	34
3.5.1. Baterijų analizatorius	34
3.5.2. Baterijų pakrovėjas	38
3.5.3. Kita įranga	41
3.6. Eksperimentinių tyrimų stendo projektavimas	42
IV. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ	45
4.1. Baterijų iškrovimo parametrų nustatymas prie skirtingų temperatūrų.....	45
4.1.1. Eksperimentiniai baterijų iškrovimo proceso tyrimai prie (23±2) °C.....	45
4.1.2. Eksperimentiniai baterijų iškrovimo tyrimai prie (-20±2) °C.....	51
4.1.3. Eksperimentinių tyrimų prie skirtingų temperatūrų rezultatų analizė ir palyginimas	57
4.2. Papildomai atlikti tyrimai	58
4.2.1. Eksperimentiniai baterijų iškrovimo tyrimai prie (23±2) °C naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną	59
4.2.2. Eksperimentiniai baterijų iškrovimo tyrimai prie (-20±2) °C naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną	65
4.2.3. Eksperimentinių tyrimų prie skirtingų temperatūrų, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną, rezultatų vidurkių analizė ir apibendrinimas	71
4.2.4. Visų gautų rezultatų vidurkių analizė ir palyginimas	73

IŠVADOS	76
LITERATŪRA	79
PRIEDAI	81
1 priedas: publikacijos	82
2 priedas: kompaktinė plokštelė	83

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1 pav. Autotransporto kuro kainų kilimas Lietuvoje (Degalų kainų statistika [interaktyvus]).....	8
2 pav. Baterijų tipų palyginimas (SB LiMotive Co., Ltd. [interaktyvus])	14
3 pav. LiCoO ₂ , LiMn ₂ O ₄ ir LiFePO ₄ struktūros (Bazito et. al. 2006).....	17
4 pav. Temperatūros ir srovės stiprio įtaka LiFePO ₄ katodo talpumui (Xiao-Zhen et al., 2008).	18
5 pav. LiFePO ₄ elektrodo talpumo priklausomybė nuo temperatūros prie kurios jis buvo pagamintas (Takahashi et al., 2001).....	19
6 pav. Mangano priemaišų įtaka LiFePO ₄ struktūros charakteristikoms (Chengfeng et al., 2011).	20
7 pav. Baterijų specifinės talpos priklausomybė nuo elektrolito: A:LiClO ₄ /EC-DMC, B:LiPF ₆ /EC-DMC, C:LiPF ₆ /EC-DMC-DEC-EMC, D:LiBF ₄ -LiBOB/PC-EC-EMC (Wei-Jun, 2010).....	21
8 pav. Headway produkcijos pavyzdžiai (Headway-Headquarters [interaktyvus]).....	22
9 pav. Prizminės baterijos konstrukcija (Cadex Electronics, Inc. [interaktyvus])	23
10 pav. A123 Systems maišelio formos baterija (123A Systems, Inc. [interaktyvus]).....	23
11 pav. Winston 90Ah LiFePO ₄ baterija (Winston Battery, Ltd. [interaktyvus]).....	24
12 pav. Winston 90Ah LiFePO ₄ baterijos vidaus vaizdas iš viršaus (Šutavičius, 2012 [interaktyvus])	24
13 pav. LiFePO ₄ baterijų pakrovimo metodo charakteristika.....	25
14 pav. BMS kainų priklausomybė nuo kontroliuojamų baterijų kiekio (Elithion, Inc.[interaktyvus])	26
15 pav. 100Ah CALB baterijos charakteristikos (CALB, Inc. [interaktyvus])	30
16 pav. 100Ah Sinopoly baterijos charakteristikos (Sinopoly Battery, Ltd. [interaktyvus])	31
17 pav. 100Ah Winston baterijos charakteristikos (Winston Battery, Ltd. [interaktyvus]).....	32
18 pav. iCharger 3010B baterijų analizatorius (iCharger New Zealand, Inc. [interaktyvus])	34
19 pav. Cell Pro Power Lab 8 baterijų analizatorius (Revolectrix Group [interaktyvus]).....	35
20 pav. CBA III Pro baterijų analizatorius (West Mountain Radio, Inc. [interaktyvus]).....	36
21 pav. Tenma 72-7670 el. energijos maitinimo šaltinis (MCM Electronics, Inc. [interaktyvus]).	38
22 pav. Mastech HY3030E el. energijos maitinimo šaltinis.....	39
23 pav. HCS-3600 el. energijos maitinimo šaltinis	40
24 pav. Magnetinis baterijų temperatūros jutiklis	42
25 pav. Multimetras UNI-T UT33D.....	42
26 pav. Termometras-higrometras TTH-1115B	42
27 pav. Variniai kontaktai ir 25 mm ² skerspjūvio ploto variniai sujungimo laidai	42
28 pav. Eksperimentinių tyrimų stendo blokinė schema	43
29 pav. Eksperimentinių tyrimų stendas.....	43
30 pav. Pagamintas specialus šaldiklio dangtis	44
31 pav. Nustatytas Winston baterijos talpumas prie (23±2) °C.....	46

32 pav. Nustatyta Winston baterijos galia prie (23±2) °C	46
33 pav. Nustatytas Winston baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C	47
34 pav. Nustatytas CALB baterijos talpumas prie (23±2) °C	48
35 pav. Nustatyta CALB baterijos galia prie (23±2) °C	48
36 pav. Nustatytas CALB baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C	48
37 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos talpumas prie (23±2) °C	49
38 pav. Nustatyta Sinopoly baterijos galia prie (23±2) °C	49
39 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C	50
40 pav. Nustatytas Winston baterijos talpumas prie (-20±2)°C	52
41 pav. Nustatyta Winston baterijos galia prie (-20±2)°C	52
42 pav. Nustatytas Winston baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C	52
43 pav. Nustatytas CALB baterijos talpumas prie (-20±2)°C	53
44 pav. Nustatyta CALB baterijos galia prie (-20±2)°C	54
45 pav. Nustatytas CALB baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C	54
46 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos talpumas prie (-20±2)°C	55
47 pav. Nustatyta Sinopoly baterijos galia prie (-20±2)°C	55
48 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C	56
49 pav. Skirtingų gamintojų baterijų darbinės įtampos diapazonai	59
50 pav. Nustatytas Winston baterijos talpumas prie (23±2) °C	60
51 pav. Nustatyta Winston baterijos galia prie (23±2) °C	60
52 pav. Nustatytas Winston baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C	60
53 pav. Nustatytas CALB baterijos talpumas prie (23±2) °C	61
54 pav. Nustatyta CALB baterijos galia prie (23±2) °C	62
55 pav. Nustatytas CALB baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C	62
56 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos talpumas prie (23±2) °C	63
57 pav. Nustatyta Sinopoly baterijos galia prie (23±2) °C	63
58 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C	64
59 pav. Nustatytas Winston baterijos talpumas prie (-20±2)°C	66
60 pav. Nustatyta Winston baterijos galia prie (-20±2)°C	66
61 pav. Nustatytas Winston baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C	66
62 pav. Nustatytas CALB baterijos talpumas prie (-20±2)°C	67
63 pav. Nustatyta CALB baterijos galia prie (-20±2)°C	68
64 pav. Nustatytas CALB baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C	68
65 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos talpumas prie (-20±2)°C	69
66 pav. Nustatyta Sinopoly baterijos galia prie (-20±2)°C	69
67 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C	70
68 pav. Nustatyto baterijų talpumo vidurkių palyginimas	73
69 pav. Nustatytos baterijų galios vidurkių palyginimas	74
70 pav. Nustatyto baterijų iškrovimo laiko vidurkių palyginimas	75

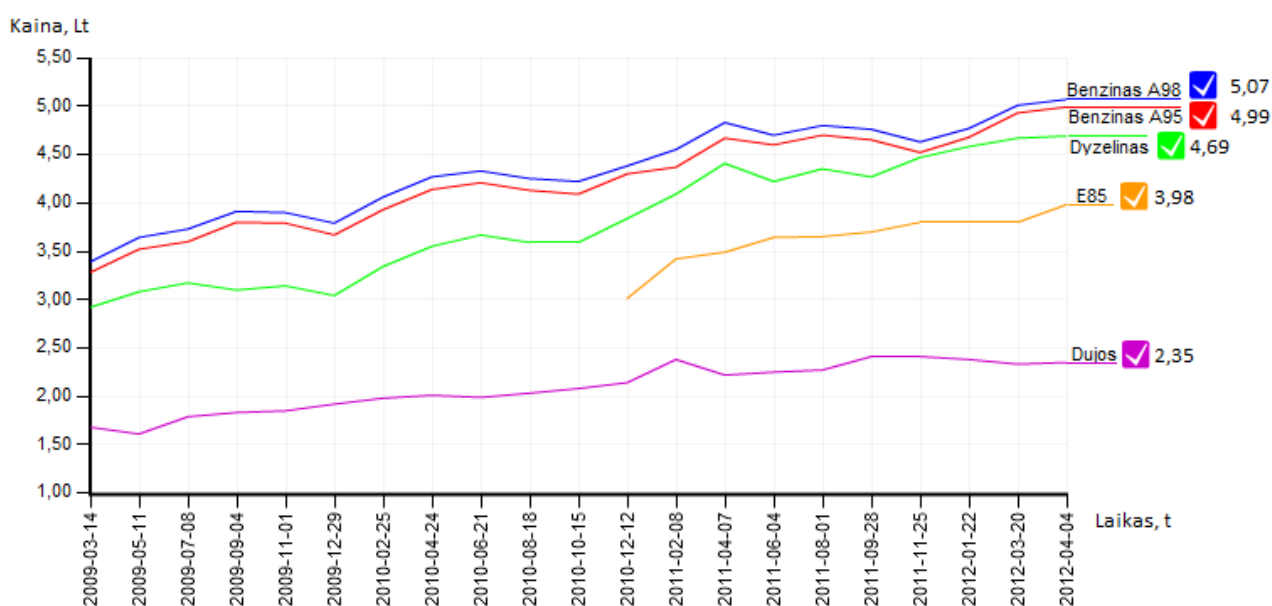
LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Įvairių tipų baterijų pranašumai, trūkumai ir ciklo n.v.k.	13
2 lentelė. Skirtingos sudėties ličio jonų baterijų palyginimas.....	14
3 lentelė. Gamintojų celių asortimentas.....	28
4 lentelė. Parinktų baterijų techninė specifikacija	32
5 lentelė. iCharger 3010B prietaiso techniniai duomenys	35
6 lentelė. Cell Pro Power Lab 8 prietaiso techniniai duomenys	36
7 lentelė. CBA III Pro prietaiso techniniai duomenys	37
8 lentelė. Baterijų analizatorių palyginimas	37
9 lentelė. Tenma 72-7670 el. energijos maitinimo šaltinio charakteristikos	38
10 lentelė. Mastech HY3030E el. energijos maitinimo šaltinio charakteristikos	39
11 lentelė. HCS-3600 el. energijos maitinimo šaltinio charakteristikos.....	40
12 lentelė. Tiriamų baterijų darbinės įtampos ribos	45
13 lentelė. Winston baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas.....	47
14 lentelė. CALB baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas	48
15 lentelė. Sinopoly baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas.....	50
16 lentelė. Baterijų iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų vidurkių apibendrinimas	51
17 lentelė. Winston baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas	53
18 lentelė. CALB baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas	54
19 lentelė. Sinopoly baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas	56
20 lentelė. Baterijų testavimo prie (-20±2) °C rezultatų vidurkių apibendrinimas	57
21 lentelė. Baterijų vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C	57
22 lentelė. Baterijų vidutinės galios sumažėjimas prie (-20±2) °C.....	58
23 lentelė. Baterijų vidutinio iškrovimo laiko sumažėjimas prie (-20±2) °C	58
24 lentelė. Winston baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas.....	61
25 lentelė. CALB baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas	62
26 lentelė. Sinopoly baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas.....	64
27 lentelė. Baterijų iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų vidurkių apibendrinimas	65
28 lentelė. Winston baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas	67
29 lentelė. CALB baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas	68
30 lentelė. Sinopoly baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas	70
31 lentelė. Baterijų iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų vidurkių apibendrinimas	71
32 lentelė. Baterijų vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C	71
33 lentelė. Baterijų vidutinės galios sumažėjimas prie (-20±2) °C.....	72
34 lentelė. Baterijų vidutinio iškrovimo laiko sumažėjimas prie (-20±2) °C	72
35 lentelė. Nustatyto baterijų talpumo vidurkių palyginimas	73

36 lentelė. Nustatytos baterijų galios vidurkių palyginimas.....	74
37 lentelė. Nustatyto baterijų iškrovimo laiko vidurkių palyginimas.....	75

IVADAS

Šiuo metų visuomenė yra susirūpinusi klimato kaitą, atsirandančiomis taršos problemomis, bei sparčiai kylančiomis autotransporto kuro kainomis. Dabartiniu metu, Lietuvoje yra pasiektos rekordiška aukštos autotransporto kuro kainos (1 pav.). Be to, prognozuojamas ir tolimesnis jų kilimas.



1 pav. Autotransporto kuro kainų kilimas Lietuvoje (Degalų kainų statistika [interaktyvus])

Realia ir praktiška alternatyva automobiliui su vidaus degimo varikliu yra elektromobilis, kadangi jis vietoj degalų, naudoja elektros energiją, kuri yra išgaunama iš baterijų, sumontuotų vietoj degalų bako. Realizavus baterijų pakrovimą nuo atsinaujinančių energijos šaltinių, energijos pagaminimo kaina būtų sumažinta iki minimumo. Naudojant ekologiškas baterijas, elektra varomo transporto tarša aplinkai yra minimali palyginus su tradiciniu transportu, kuris naudoja vidaus diegimo variklius, kadangi nereikia keisti tepalų, filtrų, uždegimo žvakių ir t.t. Taip pat tokio transporto naudojimas leistų išspėsti ne tik oro taršos problemas, bet ir padidinto triukšmo problemą (*angl. noise pollution*), nes elektra varomas transportas yra žymiai tylėsnis.

Nors pirmi elektra varomi automobiliai buvo išrasti dar 19 a., jie vis dar laikomi prabangos dalimi. Elektromobilių pramonė šiuo metu yra labai jauna visame pasaulyje. Bet kokį automobilį su vidaus degimo varikliu galima paversti elektromobiliu, tereikia sumontuoti į jį elektromobilio

sistemą, todėl Lietuvos įmonės gali mesti iššūkį didiesiems pasaulio gamintojams šioje rinkoje, kadangi visi gamintojai šiuo metu yra prie vienos starto linijos. Elektromobilio sistemos svarbiausios dalys yra traukos sistema ir baterijos.

Elektromobilių rinka Lietuvoje taip pat yra labai jauna, tačiau Lietuvos keliais jau važinėja keliasdešimt elektrinių motociklų, motorolerių, dviračių, bei keletą elektromobilių. Prognozuojama, kad šie skaičiai per ateinančius metus turėtų neįtikėtinais greitai išaugti. Be to, Lietuvoje 2011 metais balandžio 22 d. prie Kauno rajono savivaldybės pastato atidaryta pirmoji Lietuvoje europinius standartus atitinkanti elektromobilių įkrovos stotelė (Lietuvos Elektromobilių Asociacija [interaktyvus]).

Apžvelgus esamą elektromobilių situaciją rinkoje ir jos tendencijas, aiškiai matosi, kad elektra varomas transportas jau ne fantastika, o realybė ir greitu laiku gali ženkliai papildyti rinką ir pradėti konkuruoti su tradiciniais automobiliais, kurie naudoja vidaus degimo variklius. Taikant naujausias technologijas, galima pritaikyti baterijas kaip energijos šaltinį ne tik lengviesiems automobiliams, bet ir krovininiam ir visuomeniniam transportui.

Elektromobiliai yra žymiai brangesni už tradicines transporto priemones su vidaus degimo varikliu ir hibridines elektrines transporto priemones dėl aukštos baterijų kainos, kuri gali sudaryti apie pusę elektromobilio vertės, todėl rasti ekonominį balansą tarp įvairių baterijų tipų našumo ir jų energijos tankio bei kainos yra kiekvieno elektromobilio gamintojo iššūkis.

Kadangi automobiliai yra eksploatuojami labai plačiame temperatūros diapazone, yra aktualu išanalizuoti įvairios temperatūros poveikį baterijų darbui, kurių energiją elektra varomas transportas naudoja vietoj degalų.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas:

ištirti skirtingų gamintojų ličio geležies fosfato baterijų iškrovimo prie skirtingų temperatūrų procesą, siekiant nustatyti tinkamiausias baterijas panaudojimui elektra varomame transporte Lietuvos sąlygomis.

Darbo uždaviniai:

- 1) išanalizuoti siūlomų rinkoje įvairių rūšių baterijas naudojamas elektra varomame transporte;
- 2) atlikti mokslinių straipsnių analizę;
- 3) parengti eksperimentinių tyrimų metodiką;
- 4) parinkti eksperimentinių tyrimų priemones;
- 5) suprojektuoti eksperimentinių tyrimų stendą;
- 6) atlikti eksperimentinius tyrimus prie $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ir $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ temperatūros;
- 7) apibendrinti eksperimentinių tyrimų metu gautus rezultatus;
- 8) pateikti išvadas ir rekomendacijas.

I. BATERIJŲ NAUDOJAMŲ ELEKTRA VAROMAME TRANSPORTE ANALIZĖ

Dauguma elektromobilių projektų sutelkia dėmesį ties ličio jonų (*angl. Li-ion*) baterijomis ir kitomis baterijomis ličio pagrindu. Ličio pagrindo tipo baterijos dažnai pasirenkamos dėl tokių savybių kaip didelė galia ir energijos tankis, bet tokio tipo baterijos turi ribotą saugojimo laiką ir tarnavimo trukmę, kas dažnai padidina elektra varomos transporto priemonės eksploatavimo išlaidas. Tokie variantai kaip ličio geležies fosfato (LiFePO_4) ir ličio titanato (Li_2TiO_3) baterijos yra sukurtos siekiant išspręsti ličio jonų baterijų patvarumo problemas (Silberberg, 2006).

Naujove ličio jonų baterijų rinkoje yra nanofosfato (*angl. nanophosphate*) panaudojimas ličio jonų baterijų gamybai. Nanofosfatas dėl savo struktūros ypatumų, leidžia pasiekti žymiai geresnes charakteristikas – padidėja baterijų galia, tarnavimo ciklų skaičius, saugumas. Tokias baterijas šiuo metu gamina ir yra užpatentavusi JAV kompanija A123 Systems. Jų gaminamos baterijos sukurtos taip, jog netgi esant žemam pakrovimo lygiui (beveik išsikrovus), baterija vis tiek tiekia pakankamai energijos. Dar vienas šio tipo baterijų pranašumas yra tame, jog jos gali būti pakrautos nuo 0% iki 100% per vieną valandą, nedarant įtakos jų tarnavimo laikui. Gamintojas teigia, jog tokios baterijos gali būti naudojamos lengvajame ir sunkiajame transporte ir energijos saugojimo infrastruktūroje. Taip pat gamintojas pateikia charakteristikas kurios yra iš tikrųjų įspūdingos, jis teigia, kad baterijos gali būti saugomos temperatūroje nuo -40°C iki 60°C ir eksploatuojamos temperatūroje nuo -30°C iki 55°C ir netgi po 3000 iškrovimo ir pakrovimo ciklų baterijos labai gerai sugeba išsaugoti savo charakteristikas. Taip pat baterijos atitinka EUCAR saugumo reikalavimus (123A Systems, Inc. [interaktyvus]).

Alternatyvių tipų baterijos taip pat gali būti naudojamos elektra varomame transporte. Tai tokios baterijos kaip:

- švino ir sieros rūgšties (PbSO_4);
- nikelio kadmio (NiCd);
- nikelio metalo hibrido (NiMH);
- nikelio geležies (NiFe);

- išlydytos druskos baterijos (NaCl).

Taip pat yra ir kelių naujų baterijų tipų kurios yra tiriamos kaip alternatyva aukščiau paminėtoms baterijoms. Tai tokios baterijos kaip:

- ličio sieros (LiS);
- cinko-oro baterijos;
- cinko-bromo srautinės baterijos ir vanadžio redukcijos-oksidacijos srautinės baterijos.

Pats naujausias išradimas baterijų srityje yra energiją saugantis įrenginys sukurti Nanotek Instruments kompanijos bei jos dukterinės kompanijos Angstrom Materials, veikiančių Dayton, Ohajo valstijoje (JAV). Jų išrastame metode naudojami tarp elektrodų, turinčių didelius grafeno paviršius, greitai judantys dideli ličio jonų kiekiai. Pasiūlytas energijos saugojimo įrenginys gali būti ypač naudingas elektra varomiems transporto priemonėms, kurioms jis sumažintų pakrovimo laiką nuo kelių valandų iki mažiau nei minutės. Toks metodas galėtų būti sėkmingai panaudojamas ir atsinaujinančios energijos saugojimui (pavyzdžiui, saulės energijos ar vėjo energijos). Mokslininkai naująjį įrenginį pavadino „grafeno paviršiaus sukurtais ličio jonų apsikeitimo elementais“. Nors šiuo metu įrenginyje naudojamos ne pačios optimaliausios medžiagos bei konfigūracijos, tačiau jie jau dabar lenkia visais parametrais ličio jonų baterijas ir super-kondensatoriuose gaunamą galios tankį (Mokslo naujienos [interaktyvus]).

Tačiau visiems šiems tyrimams dar reikia labai daug laiko. Sukūrus visiškai naują bazę, naujieji energijos saugojimui skirti įrenginiai padės apeiti iškilusias problemas.

1.1. Baterijų tipų analizė

Būdingas baterijų bruožas yra labai geras viso ciklo efektyvumas – tik švino rūgštinių ir NiCd baterijų efektyvumas yra žemesnis (apie 60-75 %), o NiMH ir ličio jonų baterijų efektyvumas siekia apie 80-95 %. Įvairių tipų baterijų parametrai buvo smarkiai patobulinti per pastaruosius keletą metų ir šis procesas vyksta toliau. Naudojant nanotechnologijas JAV neseniai sukurtos ženkliai pigesnės ličio sieros baterijos į kurias bus galima įkrauti apie 3 kartus daugiau elektros energijos negu į dabar naudojamas tokio paties tūrio ličio jonų baterijas. Šioje srityje dirbantys mokslininkai prognozuoja, kad baterijų energijos tankis naudojant nanotechnologijas gali padidėti kartais (iki 1-4 kWh/kg) lyginant su dabartiniais rodikliais, o jų kaina žymiai sumažės. Dar manoma, kad ateityje elektromobiliuose ir hibridiniuose automobiliuose super-kondensatoriai gali pakeisti baterijas. Jie yra vieni iš efektyviausių energijos kaupiklių, kurių viso ciklo nuo elektros energijos sukauptimo iki

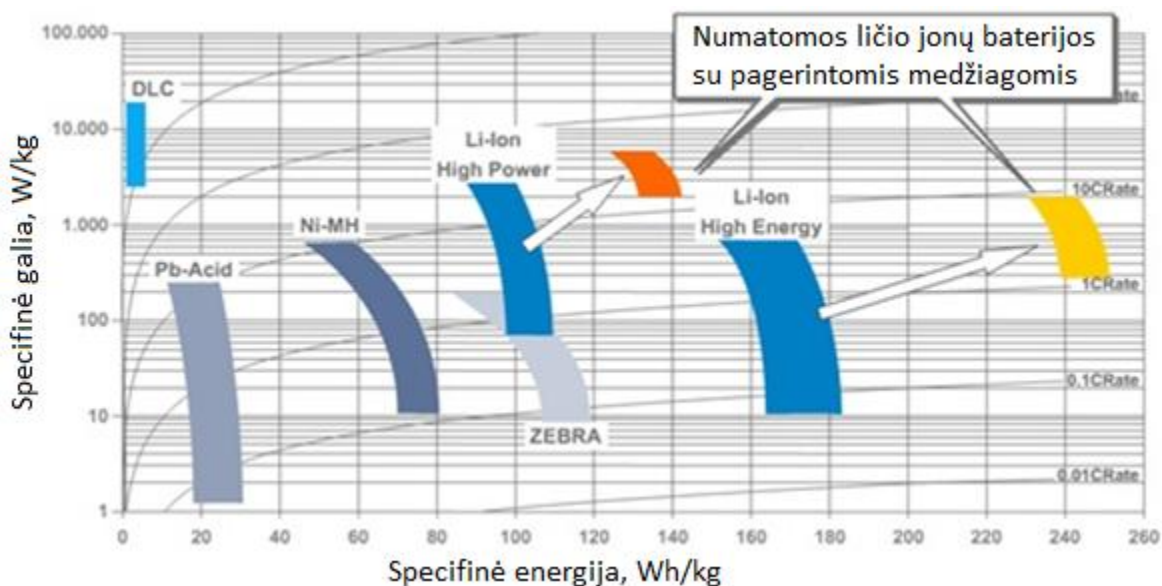
jos grąžinimo į šaltinį naudingo veikimo koeficientas viršija 95 %. Šiuo metu jie turi patį didžiausią galios tankį iš visų elektros energijos kaupiklių – nuo 1 iki 10 kW/kg. tačiau juose sukauptos energijos tankis yra nedidelis (Linden et al., 2002; ThermoAnalytics, Inc. [interaktyvus]).

Žemiau yra pateikiami įvairių tipų baterijų pranašumai, trūkumai ir ciklo n.v.k. (naudingo veikimo koeficientai) (1 lentelė):

1 lentelė. Įvairių tipų baterijų pranašumai, trūkumai ir ciklo n.v.k.

Baterijos tipas	Pranašumai	Trūkumai	Ciklo n.v.k., %
ličio jonų (Li-ion)	Dideli galios, energijos tankiai ir efektyvumas	Brangi gamyba, reikia specialios įkrovimo schemas	90-95
švino ir sieros rūgšties (PbSO ₄)	Maži kapitaliniai kaštai	Mažas įkrovos/iškrovos ciklų skaičius, kai gilios iškrovos, kenksminga aplinkai	50-75
nikelio kadmio (NiCd)	Dideli galios, energijos tankiai ir efektyvumas	Kenksminga aplinkai	60-70
nikelio metalo hibrido (NiMH)	Didelis efektyvumas ir galios tankis, maža kaina	Nedidelis energijos tankis	80-90
nikelio geležies (NiFe)	Didelis įkrovos/iškrovos ciklų skaičius	Nedidelis energijos tankis, labai blogai veikia žemoje temperatūroje	80-90

Iš pateiktos lentelės matome, kad geriausios baterijos pagal savo charakteristikas yra ličio jonų baterijos. Tokią pat išvadą padarė tarptautinė baterijų, skirtų elektra varomam transportui, gamybos kompanija SB LiMotive, kuri yra sukurta bendradarbiaujant tokioms žinomoms kompanijoms kaip Bosch ir Samsung. SB LiMotive išskiria ličio jonų baterijas kaip pačias perspektyviausias ir pranašiausias baterijas panaudojimui elektra varomo transporto srityje (2 pav.).



2 pav. Baterijų tipų palyginimas (SB LiMotive Co., Ltd. [interaktyvus])

Iš aukščiau pateiktų palyginimų galima teigti, jog iš visų baterijų tipų, kurie buvo palyginti, ličio jonų baterijos yra pranašesnės už kitas baterijas pagal savo charakteristikas. Vienintelis tokių baterijų trūkumas yra jų aukšta kaina, bet turint omenyje, jog tokios baterijos yra sparčiai tobulinamos nanotechnologijų pagalba ir yra prognozuojamas jų kainos kritimas, kuris yra stebimas jau dabar, galima manyti, kad kaina yra tik laikinas trūkumas. Reikia nepamiršti ir tai, jog yra daugybė skirtingų ličio jonų baterijų. Jų charakteristikos priklauso nuo naudojamų medžiagų jų gamybai. Ličio jonų baterijos labai skiriasi priklausomai nuo to, kokios medžiagos yra naudojamos jų katodų ir anodų gamybai. Medžiagos, kurios panaudojamos ličio jonų baterijų gamybai tiesiogiai gali įtakoti tokius faktorius kaip baterijų pagaminimo kaina, galios ir energijos tankis, darbinės temperatūros diapazonas, tarnavimo laikas ir saugumas. Dėl šios priežasties, reikia palyginti įvairias ličio jonų baterijas tam, kad galima būtų nustatyti tokias ličio jonų baterijas, kurios labiausiai tinka panaudojimui elektra varomame transporte.

1.2. Ličio jonų baterijų palyginimas

Ličio baterijų veikimo principas paremtas tuo, kad iškrovimo ir pakrovimo metu ličio jonai migruoja tarp katodo (teigiamo elektrodo) ir anodo (neigiamo elektrodo), kur pririšami cheminėmis jungtimis (Cadex Electronics, Inc. [interaktyvus]). Baterijos charakteristikos priklauso nuo jos sudedamųjų dalių cheminių savybių. Žemiau yra pateiktas skirtingų tipų ličio jonų baterijų palyginimas (2 lentelė):

2 lentelė. Skirtingos sudėties ličio jonų baterijų palyginimas

Elektrodo cheminė formulė	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄	LiNiMnCoO ₂
Kaina	Aukšta	Aukšta	Aukšta	Aukšta
Energijos tankis	Labai aukštas	Aukštas	Vidutinis	Labai aukštas
Galios tankis	Vidutinis	Aukštas	Aukštas	Aukštas
Darbinės temperatūros diapazonas	Vidutinis	Vidutinis	Geras	Geras
Tarnavimo laikas	Vidutinis	Vidutinis	Labai ilgas	Ilgas
Saugumas	Žemas saugumas. Reikalinga apsaugos grandinė ir celių		Aukštas saugumas. Reikalinga įtampos apsaugos	Vidutinis saugumas. Reikalinga apsaugos

	balansavimas	grandinė ir celių balansavimas	grandinė ir celių balansavimas
--	--------------	-----------------------------------	-----------------------------------

Iš aukščiau pateiktos lentelės galima spręsti, kad pagal energijos tankį LiCoO_2 , LiMn_2O_4 ir LiNiMnCoO_2 aplenkia LiFePO_4 baterijas, tačiau tai tik parodo, kad jos gali sukaupti savyje daugiau energijos. Jeigu kalbėti apie galios tankį (apkrovos charakteristikas) ir stabilumą prie žemos ir aukštos temperatūros, tada LiMn_2O_4 ir LiFePO_4 baterijos yra pranašesnės už kitas. Tačiau taikant baterijas elektra varomame transporte, baterijų saugumas ir tarnavimo laikas yra svarbesnis už talpumą ir būtent todėl, LiFePO_4 baterijos yra išrinktos kaip pačios tinkamiausios panaudojimui elektra varomame transporte.

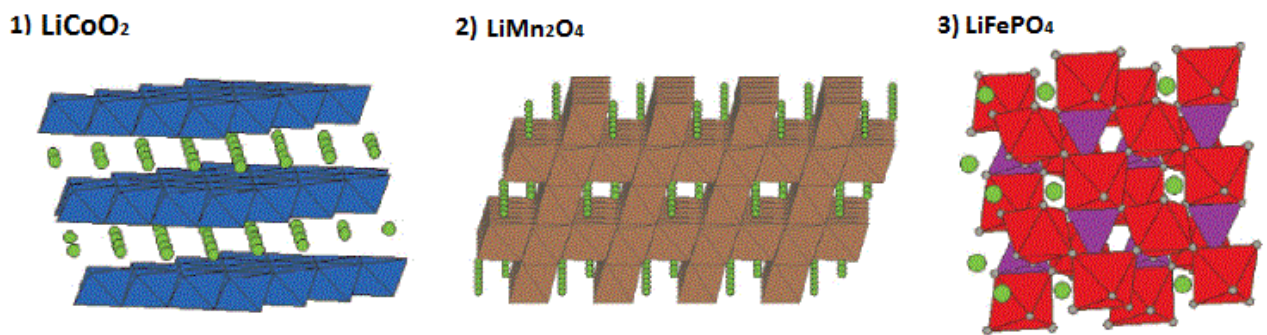
Atlikta baterijų analizė ir įvairių rūšių baterijų palyginimas leido išrinkti ličio geležies fosfato baterijas kaip pačias tinkamiausias panaudojimui elektra varomame transporte, būtent todėl šios rūšies baterijų iškrovimo procesas yra ištirtas šiame darbe.

II. MOKSLINIŲ STRAIPSNIŲ ANALIZĖ

1996 metais, tyrinėjimo grupė, iš Teksaso universiteto, atlikus tyrimus nustatė, kad ličio geležies fosfatas puikiai tinka kaip katodo medžiaga pakartotinai įkraunamoms ličio baterijoms. Tokios baterijos buvo greitai pripažintos rinkoje dėl sąlyginai žemos jų gamybos kainos, ekologiškumo, plataus darbinės temperatūros diapazono, saugumo charakteristikų, elektrocheminių savybių ir teorinės specifinės talpos (170 mAh/g) (Padhi et al., 1996). Tačiau iš pat pradžių šio tipo baterijos turėjo problemą – jos pasižymėjo žemu elektros energijos pralaidumu ir iki 2003 metų šios rūšies baterijos praktiškai nebuvo vystomos. Tačiau ši problema greitai buvo išspręsta kai šios rūšies baterijas pradėjo vystyti A123 System kompanija. A123 Systems kompanija išsprendė žemo elektros energijos pralaidumo problemą mažinant daleles iki nano dydžių naudojant nanotechnologijas. Tai leido pasiekti labai geras baterijų charakteristikas, ko pasėkoje ličio geležies fosfato baterijos tapo labai plačiau naudojamos prietaisuose, kurie reikalauja didelės talpos ir didelės galios baterijų. Vienas iš tokių prietaisų yra elektromobilis. Elektromobilių gamintojai pradėjo svarstyti galimybę pritaikyti tokias baterijas elektra varomam transportui. Vienas iš svarbiausių elektromobilio gamintojų uždavinių yra pravažiuotas atstumas po pilno pakrovimo. Tačiau dėl to kad elektromobiliai gali būti eksploatuojami skirtingomis temperatūros sąlygomis, o yra žinoma, kad temperatūra įtakoja ličio jonų baterijų veikimą, elektromobilių gamintojai pradėjo svarstyti apie tai, kaip pagerinti šių baterijų veikimą įvairiomis temperatūros sąlygomis.

2.1. LiFePO_4 struktūra

LiFePO_4 struktūra labai skiriasi nuo kitų struktūrų, naudojamų ličio jonų baterijų katodų gamybai, tokių kaip LiCoO_2 ir LiMn_2O_4 (3 pav.)



3 pav. LiCoO_2 , LiMn_2O_4 ir LiFePO_4 struktūros (Bazito et. al. 2006)

Geležies pagrindo katodo medžiagos yra ekologiškos, pigios, nesudėtingos gamybos ir atsparios šilumai palyginus su LiCoO_2 , LiNiO_2 ir LiMn_2O_4 . LiFePO_4 gali būti naudojamas kaip katodo medžiaga dėl savo aukšto iškrovimo potencialo (apie 3,4 V) ir vidutinio teorinio talpumo (170 mA h g^{-1}). Nepaisant savo pranašumų, LiFePO_4 struktūra pasižymi žemu pralaidumu ($\sim 10^{-9} \text{ S cm}^{-1}$) ir dėl to jos elektrocheminės charakteristikos yra apribotos.

Siekiant pagerinti ir optimizuoti LiFePO_4 pralaidumą, mokslininkai atidžiai tyrinėja šią struktūrą. Yra padaryti moksliniai pranešimai, kuriuose teigiama, kad vienas iš struktūros pralaidumo pagerinimo būdų yra jonų ir elektronų dalelių mažinimas, o kitas būdas yra naudoti anglies ir LiFePO_4 nanodaleles.

LiFePO_4 struktūra gali būti pagaminta įvairiomis sąlygomis ir priklausomai nuo sintezės sąlygų galima gauti struktūrą pasižyminčią skirtingu talpumu. Mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad paruošiant LiFePO_4 nanodaleles įvairiais būdais, buvo gauti labai skirtingi rezultatai. Gaminant šią struktūrą kaitinant tam tikrus komponentus prie 550°C leido gauti nanodaleles (100-150 nm) kurios pasižymėjo itin aukštu talpumu (160 mA h g^{-1}), tačiau tiriant jų tarnavimo laiką, jų talpumas sumažėjo. Pagaminus tą pačią struktūrą skystos fazės metodu, buvo gautos dar mažesnės nanodalelės (5-50 nm), kurios parodė neįtikėtiną stabilumą ir tiriant jų tarnavimo laiką jų talpumas nesumažėjo, tačiau šios dalelės pasižymėjo sąlyginai mažu talpumu (90 mA h g^{-1}) (Bazito et. al. 2006).

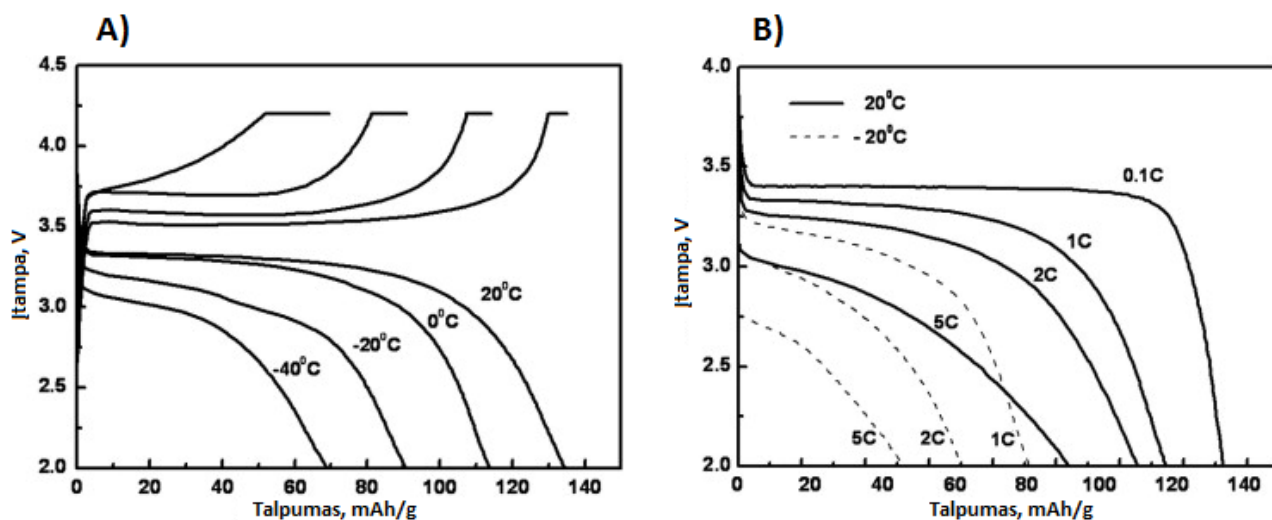
2.2. LiFePO_4 darbinės temperatūros diapazonas

Kaip ir žmonės, baterijos veikia geriausiai prie normalios temperatūros. Prie aukštos temperatūros sumažėja baterijų vidinė varža ir dėl to pagreiteja jų cheminis metabolizmas, tačiau tai

gali sumažinti jų tarnavimo laiką. O prie žemos temperatūros padidėja baterijų vidinė varža ir sumažėja jų talpumas. Baterijos pasiekia optimaliausią tarnavimo laiką, jeigu yra naudojamos prie 20 °C temperatūros. Prie žemos temperatūros (-20 °C) baterijų veikimas smarkiai pablogėja, o kai kurios baterijos išvis nustoja veikti arba sugenda (Cadex Electronics, Inc. [interaktyvus]).

Dėl patvarios struktūros, LiFePO₄ baterijų iškrovimo temperatūros diapazonas yra nuo -20 °C iki 60 °C laipsnių. Šitas diapazonas gali neženkliai skirtis priklausomai nuo gamintojo. Taip pat neleidžiama pakrauti LiFePO₄ baterijas prie neigiamos temperatūros arba prie labai aukštos temperatūros ir pakrovimo temperatūros diapazonas dažniausiai yra nuo 0 °C iki 45 °C ir taip pat gali neženkliai skirtis priklausomai nuo gamintojo.

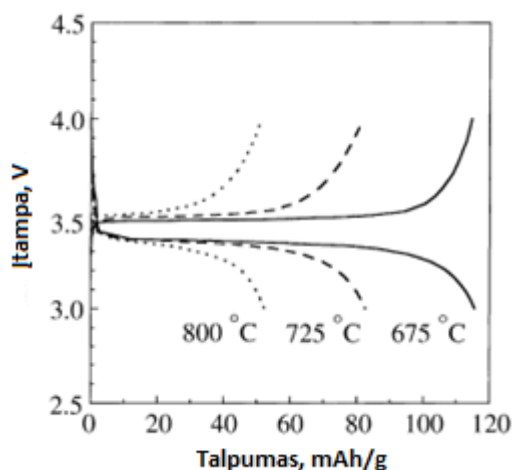
Kinijos mokslininkai ištyrė LiFePO₄ katodo talpumą iškrovimo metu pamerkimus jį į elektrolitą. Iškrovimo metu prie 20 °C temperatūros buvo užfiksuotas 134 mAh/g talpumas, prie 0 °C - 114 mAh/g talpumas, prie -20 °C - 90 mAh/g talpumas, o prie -40 °C - 69 mAh/g talpumas (4 pav. punktas A). Tyrimas parodė, kad dėl lėto ličio jonų apsikeitimo proceso, didinant iškrovimo srovės stiprumą, talpumas mažėja (4 pav. punktas B), ypač prie žemos temperatūros. Elektrocheminės varžos analizė patvirtino, kad pakrovimo-iškrovimo metu prie žemos temperatūros katodo veikimo savybės pablogėja dėl labai lėto jonų reagavimo (Xiao-Zhen et al., 2008).



4 pav. Temperatūros ir srovės stiprio įtaka LiFePO₄ katodo talpumui (Xiao-Zhen et al., 2008).

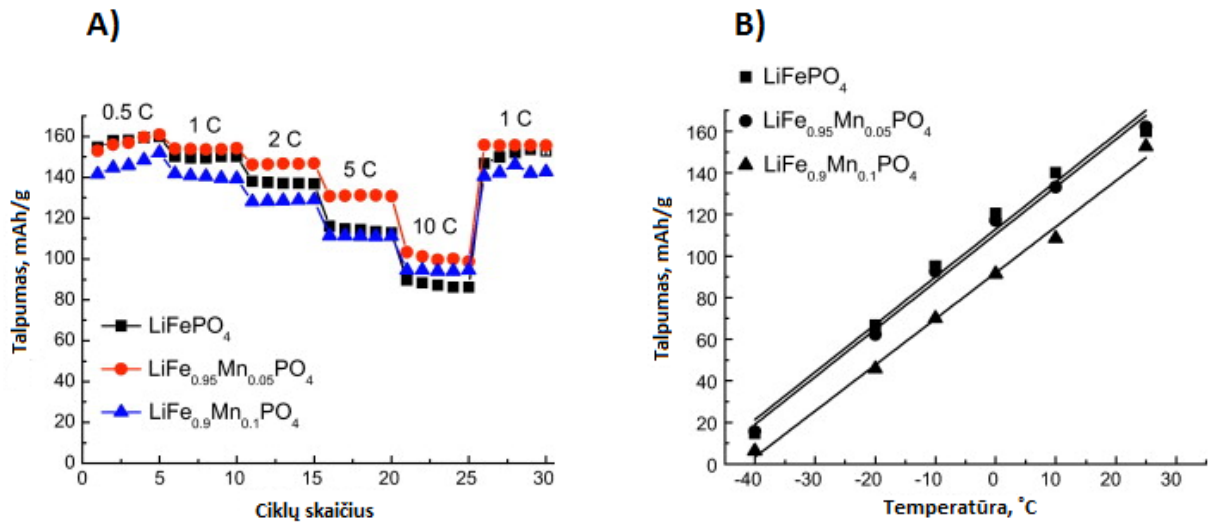
Kitas tyrimas parodė, kad galima pasiekti aukštą talpumą prie žemos (-20 °C) temperatūros ne dalelių mažinimo būdu, o keičiant struktūrą naudojant fluoro priemaišas. Šie tyrimai parodė, kad fluoru apdorota struktūra prie -20 °C pasižymėjo 82 mAhg⁻¹ talpumu, tuo tarpu kai neapdorota struktūra pasižymėjo tik 65 mAhg⁻¹ talpumu. Tyrimai parodė, kad fluoro priemaišos pagerino pralaidumą ir elektrochemines charakteristikas prie žemos temperatūros (Borong, et al., 2011).

Dar vienas tyrimas parodė, kad LiFePO_4 struktūros talpumas priklauso nuo temperatūros kurioje ji buvo pagaminta. Eksperimento metu, LiFePO_4 struktūra buvo pagaminta prie trijų skirtingų temperatūrų: 800 °C, 750 °C ir 675 °C. Buvo iširtos šitų trijų struktūrų pakrovimo ir iškrovimo charakteristikos vienodomis sąlygomis. Struktūra, kuri buvo pagaminta prie 675 °C temperatūros pasižymėjo didžiausiu talpumu (5 pav.).



5 pav. LiFePO_4 elektrodo talpumo priklausomybė nuo temperatūros prie kurios jis buvo pagamintas (Takahashi et al., 2001)

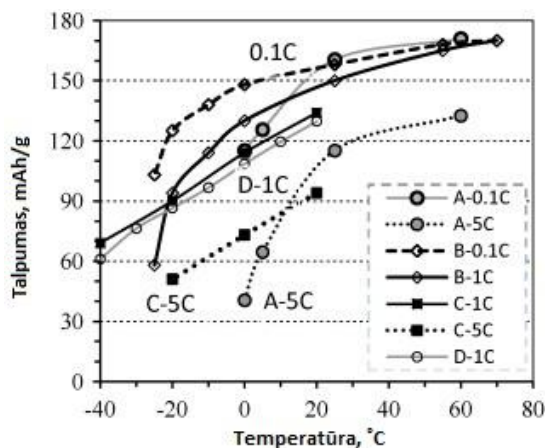
Buvo daromas bandymas pagerinti LiFePO_4 struktūros charakteristikas prie aukštų iškrovimo srovių ir žemos temperatūros papildant struktūrą mangano priemaišomis. Įvairaus mangano priemaišų kiekio turintys bandiniai buvo lyginami su bandinių be mangano priemaišų prie įvairaus stiprumo iškrovimo srovių (6 pav. punktas A). Tyrimų rezultatai parodė, jog nedidelis mangano priemaišų kiekis pagerino struktūros charakteristikas prie aukštų iškrovimo srovių, tačiau mangano priemaišos neturėjo jokios įtakos struktūros charakteristikų pagerinimui prie žemos temperatūros (6 pav. punktas B). Mokslininkai padarė išvadą, jog norint pagerinti baterijų charakteristikas, naudojančių ličio geležies fosfatą kaip katodą, reikia bandyti keisti pačią katodo struktūrą (Chengfeng et al., 2011).



6 pav. Mangano priemaišų įtaka LiFePO_4 struktūros charakteristikoms (Chengfeng et al., 2011).

LiFePO_4 baterijos greitai tampa labai populiariu tyrimo objektu ir mokslininkai ieško įvairių būdų kaip pagerinti tokių baterijų charakteristikas prie aukštų srovių ir žemos temperatūros. Tokių baterijų talpumas prie įvairių sąlygų labai priklauso nuo daugelio faktorių, tokių kaip: dalelių dydis, priemaišos, anglinis padengimas, sintezės būdas ir sumaišymo procedūra. Analizės rodo, kad elektrinis laidumas tarp LiFePO_4 katodo ir anodo turi kritišką vaidmenį baterijų charakteristikose. Anglinis padengimas pagerina LiFePO_4 charakteristikas geriau negu dalelių mažinimas arba padengimas katijonais. Kadangi $\text{LiFePO}_4/\text{FePO}_4$ reakcija yra nedifuzinė, elektronų ir ličio jonų transportavimas per daleles neapriboja viso proceso. Daug svarbesnis yra greitas elektronų transportavimas nuo dalelių paviršiaus iki surinkėjo prie aukštų srovių kai ličio jonų sklaidimas per elektrolitą prie grafito anodo nėra apribotas. Todėl, prie aukštų srovių, anglinis padengimas yra daug svarbesnis už dalelių mažinimą.

Blogas ličio jonų baterijų veikimas žemoje temperatūroje yra vienas iš techninių barjerų tokių baterijų panaudojimui elektra varomame transporte. Pastebėta, kad LiFePO_4 talpumas smarkiai sumažėja žemoje temperatūroje, o ypač temperatūroje, žemesnėje negu $-20\text{ }^\circ\text{C}$. Talpumas sumažėja žemoje temperatūroje dėl apribotos elektrodų kinetikos, žemo elektrolito laidumo, žemo ličio jonų sklaidimo ir aukšto elektrodo/elektrolito pasipriešinimo. Tyrimai parodė, kad galima pagerinti baterijų talpumą prie žemos temperatūros optimizuojant elektrolitą. Ketvirtainiu karbonatu pagrįstas elektrolitas (mėginiai C-D, 7 pav.) pagerina baterijų specifinį talpumą prie žemesniu negu $-20\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros palyginus su dvinariu elektrolitu (mėginiai A-B, 7 pav.). Sumaišytų $\text{LiBF}_4\text{-LiBOB}$ druskų panaudojimas elektrolite pagerina talpumą plačiame temperatūros diapazone (-50 iki 80) $^\circ\text{C}$ palyginant su įprastu LiBF_4 elektrolitu (Wei-Jun, 2010).



7 pav. Baterijų specifinės talpos priklausomybė nuo elektrolito: A:LiClO₄/EC-DMC, B:LiPF₆/EC-DMC, C:LiPF₆/EC-DMC-DEC-EMC, D:LiBF₄-LiBOB/PC-EC-EMC (Wei-Jun, 2010).

2.3. LiFePO₄ baterijų formos

LiFePO₄ baterijos yra gaminamos trijų skirtingų formų:

1) Cilindrinės formos baterija. Tai pati populiariausia iki šiol buvusi forma, tai cilindrinė baterijos forma. Tačiau tokia forma kartais yra ekonomiškai nenaudinga, nes tokios formos baterijos yra gaminamos sąlyginai mažos talpos ir projektuojant didelės talpos baterijų modulius reikia projektuoti baterijų išdėstymo kameras ir sudėtingas sujungimo konstrukcijas. Be to, norint sujungti tokių baterijų kontaktus dažnai reikia naudoti specialius sujungimo adapterius arba specialius litavimo prietaisus skirtus tokioms baterijoms. Tokia baterijų formą neleidžia maksimaliai efektyviai išnaudoti erdvę, tačiau tai suteikia pranašumą aušinant tokias baterijas oro srautu. Vienas iš žinomiausių didelės talpos cilindrinė baterijų gamintojas yra Headway. Šitas gamintojas gamina cilindrinės formos LiFePO₄ baterijas, kurių talpa siekia iki 16Ah. Šito gamintojo produkcija dažniausia yra taikoma elektra varomiems motoroleriams, dviračiams, motociklams ir t.t. Šio gamintojo produkcijos pavyzdys yra pateikiamas žemiau (8 pav.).



8 pav. Headway produkcijos pavizdžiai (Headway-Headquarters [interaktyvus])

2) **Prizminės formos baterija.** 1990 metais pristatyta prizminė baterijos forma. Tokios baterijos buvo sukurtos, kad patenkinti tuo metu buvusį poreikį plonomis baterijoms su žema pagaminimo kaina. Dėl to, kad baterijos viduje elektrodai yra suvynioti plonais sluoksniais, šios baterijos pasižymi aukštą efektyvumu erdvės išnaudojimo atžvilgių (9 pav.). Tokios formos ličiojonų baterijos yra labai plačiai naudojamos mobiliuosiuose telefonuose. Nėra jokio universalaus šio tipo formato, nes kiekvienas gamintojas sukuria savo dizainą taip, kad baterija būtų galima pritaikyti tam tikram gaminiui. Jeigu prietaiso dizainas leidžia naudoti didesnių didžiųjų bateriją tai baterija bus pagaminta didesne tam, kad jos talpumas būtų didesnis ir prietaisas galėtų veikti ilgiau. Prizminės baterijos forma leidžia efektyviai išnaudoti erdvę ir gaminti baterijas atsižvelgiant į tam tikrus dydžio ir formos reikalavimus, tačiau tai gali būti brangiau negu gaminti cilindrinės baterijas, be to, tokias baterijas gali būti sunku suvaldyti įvairiomis temperatūros sąlygomis ir jos gali turėti trumpesnę tarnavimo laiką negu cilindrinės baterijos. Prizminės baterijos reikalauja plono metalinio korpuso norint kompensuoti žemą mechaninio stabilumo lygį. Tačiau dėl optimaliai išnaudotos erdvės, plonas metalinis korpusas daro labai mažą įtaką baterijos talpumo sumažėjimui (Cadex Electronics, Inc. [interaktyvus]).



9 pav. Prizminės baterijos konstrukcija (Cadex Electronics, Inc. [interaktyvus])

3) *Maišelio formos baterija.* 1995 metais buvo sukurta nauja baterijų forma, kuri nustebino pasaulį savo neįprastu dizainu. Tai yra maišelio formos baterijos. Tokių baterijų pranašumas yra jų plonumas ir mažas svoris. Vienas iš geriausių maišelio formos baterijų gamintojų yra A123 Systems. Šis gamintojas naudoja nanofosfatą baterijų gamybai ir būtent todėl jo produkcija pasižymi ypač geromis charakteristikomis, paliginus su kitų gamintojų maišelio formos baterijomis. A123 Systems gamina 20Ah talpos maišelio formos baterijas (10 pav.).



10 pav. A123 Systems maišelio formos baterija (123A Systems, Inc. [interaktyvus]).

Šios baterijos yra pačios efektyviausios erdvės išnaudojimo atžvilgiu. Tačiau atsisakant apsauginio metalinio korpuso, baterijos tampa labai pažeidžiamos ir joms neretai tampa reikalinga speciali laikymo kamera. Tokios baterijos dažniausiai yra taikomos plataus vartojimo gaminiuose, karo technikoje ir automobilių pramonėje.

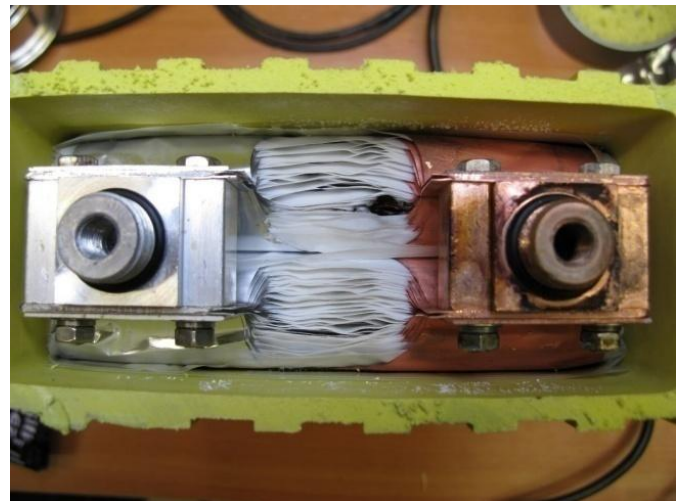
2.4. Didelės talpos LiFePO₄ baterijos

Naudojant mažos talpos baterijas, yra reikalingas didelis jų kiekis, o tai padidina visos sistemos kainą ir sudėtingumą, be to, kuo daugiau komponentų yra naudojama sistemoje, tuo sistemos patikimumas mažesnis. Nereikia užmiršti ir apie tai, kad prie kiekvienos baterijos turi būti prijungta įtampos kontrolės sistema. Todėl elektra varomame transporte, o ypač sunkiajame, efektyviausiai yra naudoti didelės talpos baterijas.

Didžiausios talpos gaminamos LiFePO₄ baterijos, yra prizminės formos baterijos su daugybe maišelio formos baterijų viduje. Norint sumažinti gamybos kainą, tokių baterijų korpusas yra gaminamas iš plastiko. Tam, kad baterija galėtų būti iškraunama ir pakraunama ypač didele srove, elektrodų kontaktai gaminami iš storo metalo, kuris sujungia daugybę maišelio formos baterijų elektrodų kartu. Didžiausi tokių baterijų gamintojai yra CALB, Winston Battery, Sinopoly, HiPower, RealForce ir kt. Žemiau yra parodyta kaip atrodo Winston Battery gamintojo 90Ah baterija iš išorės ir iš vidaus (11-12 pav.).



11 pav. Winston 90Ah LiFePO₄ baterija
(Winston Battery, Ltd. [interaktyvus])

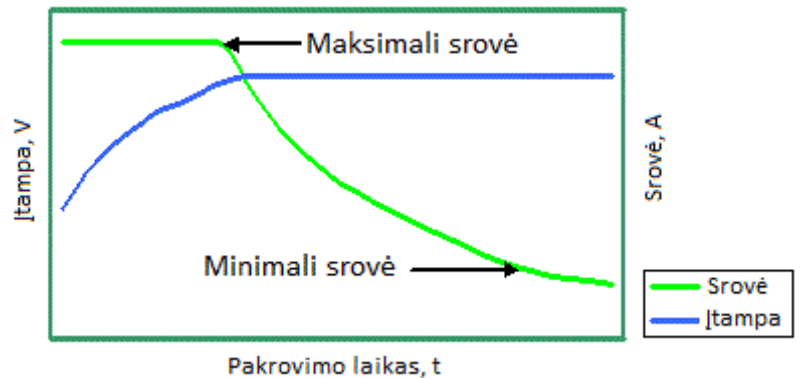


12 pav. Winston 90Ah LiFePO₄ baterijos vidaus
vaizdas iš viršaus (Šutavičius, 2012 [interaktyvus])

Taip pat tokios baterijos gali turėti tradicinę prizminių baterijų vidinę struktūrą kada elektrodai yra suvynioti aplink vienas kitą, o ne sujungti kartu. Tokios baterijos jau yra plačiai naudojamos elektra varomame lengvajame ir sunkiajame transporte Kinijoje. Šio tipo baterijos maksimali talpa gali siekti iki 10000 Ah.

2.5. LiFePO₄ baterijų pakrovimas ir iškrovimas

Tipiškai LiFePO₄ baterijos yra pakraunamos iki 4,2 V įtampos. Tokio tipo baterijos yra labai jautrios perkrovimui ir yra sugadinamos, jeigu yra pakraunamos virš 4,2 V įtampos. Perkrovimo atveju, baterijoje susidarys spaudimas ir suveiks apsauginis vožtuvas, kuris išleis iš baterijos susidariusias dujas. LiFePO₄ baterijos, skirtingai nuo kitų rūšių ličio baterijų pasižymi aukšta perkrovimo tolerancija (PowerStream Technology, Inc. [interaktyvus]). Šio tipo baterijos yra pakraunamos nuolatinės srovės – nuolatinės įtampos (CC/CV) (angl. CC - Constant Current; CV - Constant Voltage) metodų. Baterijų pakrovimo įrenginys turi sugebėti kontroliuoti baterijos įtampą ir persijungti iš nuolatinės srovės režimo į nuolatinės įtampos režimą prieš baterijai pasiekiant aukščiausią leistiną įtampą (13 pav.).



13 pav. LiFePO₄ baterijų pakrovimo metodo charakteristika

Norint palaikyti pakrovimą nustatyto stiprumo srove, pakrovimo įtampa turi būti didinama atsižvelgiant į baterijos įtampos didėjimą. Pakrovimo įtampa yra greitai didinama nuolatinės srovės režime tol, kol pasiekiamas baterijos pakrovimo įtampos ribos taškas, po kurio yra palaikoma pastovi įtampa, o srovė pradeda mažėti. Pakrovimas skaitosi baigtas, kai pasiekiamas nustatytas minimalios srovės taškas (Woodbank Communications, Ltd. [interaktyvus]). Po to kai pakrovimas nutraukiamas, baterijos įtampa pradeda mažėti iki tam tikros įtampos 3,30 V - 3,90 V intervale, priklausomai nuo to kaip ilgai ir kokio stiprumo srove baterija buvo kraunama. Norint prailginti tokių baterijų tarnavimo laiką, jas reikėtų pakrauti iki mažesnės negu 4,2 V įtampos. Labai dažnai baterijų gamintojai savo produkcijos specifikacijose nurodo mažesnę pakrovimo ribos įtampą, kad apsaugoti baterijas nuo perkrovimo ir taip prailginti jų tarnavimo laiką.

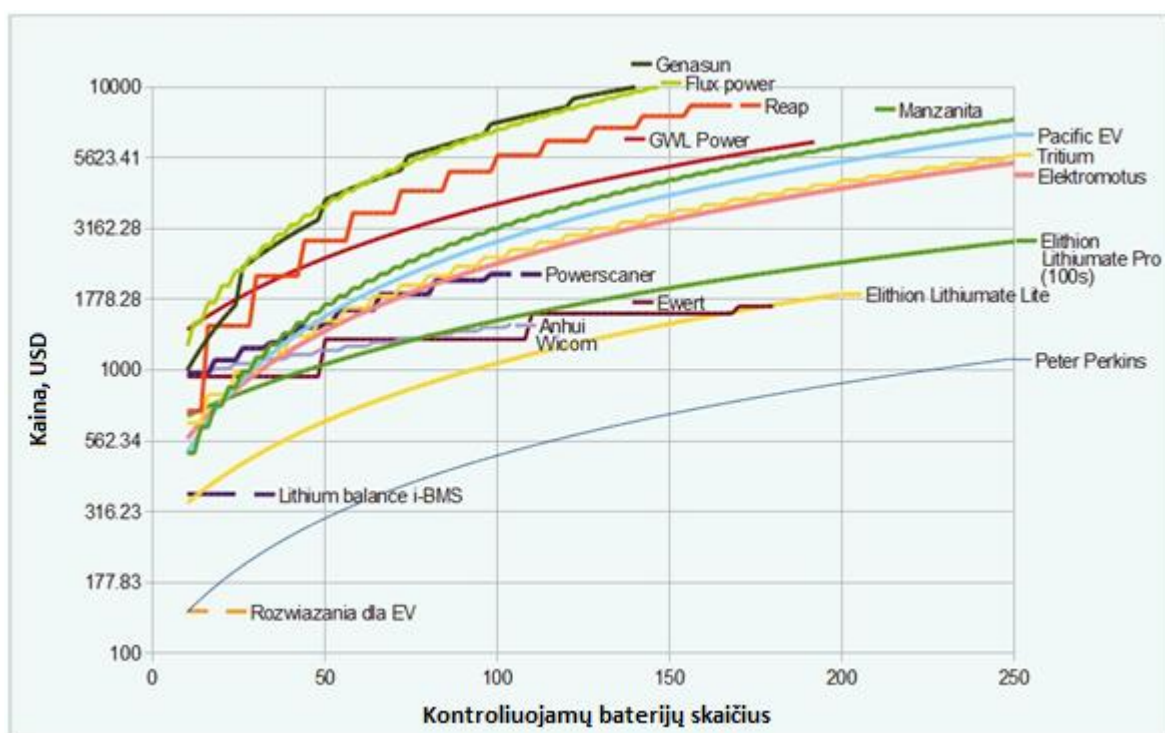
Iškraunant ličio geležies fosfato bateriją, labai svarbu neiškrauti jos žemiau 2,0 V įtampos ribos. Tai gali sutrumpinti baterijos tarnavimo laiką arba nepataisomai ją sugadinti. Baterijų gamintojai dažnai nurodo aukštesnę baterijų iškrovimo įtampos ribą norint apsaugoti baterijas nuo pilno iškrovimo ir taip prailginti jų tarnavimo laiką.

2.6. LiFePO₄ baterijų apsaugos grandinė

Tam, kad apsaugoti baterijas nuo perkrovimo ir pilno iškrovimo yra naudojamos baterijų apsaugos grandinės. Taip pat žinomos kaip baterijų valdymo sistemos, sutrumpintai - BMS (*angl. Battery Management System*). Tokių sistemų pagalba galima stebėti baterijų įtampa, kontroliuoti jas pakrovimo arba iškrovimo metų ir atlikti baterijų balansavimą.

Norint panaudoti LiFePO₄ baterijas elektra varomame transporte, reikalingas didelis baterijų kiekis. O apjungus daug baterijų kartų atsiranda jų balansavimo problema. BMS sistemos naudojimas padeda išspėsti tokią problemą.

BMS kaina tiesiogiai priklauso nuo kontroliuojamų baterijų kiekio. Labai dažnai tokiose sistemose prie kiekvienos baterijos prijungiama speciali schema, kuri stebi ir kontroliuoja baterijos būklę. Didesnis baterijų kiekis automatiškai padidina sistemos sudėtingumą, kainą ir eksploataavimo bet techninio aptarnavimo išlaidas. Todėl didesnis baterijų kiekis gali gerokai padidinti elektra varomos transporto priemonės savikainą. Įvairių gamintojų BMS kainų priklausomybė nuo kontroliuojamų baterijų kiekio yra parodyta žemiau (14 pav.).



14 pav. BMS kainų priklausomybė nuo kontroliuojamų baterijų kiekio (Elithion, Inc.[interaktyvus])

Šiame darbe dėmesys skiriamas pavienėms baterijoms, todėl atliekant tyrimus BMS sistema yra neaktuali. BMS sistemos panaudojimas tampa aktualus tik tada kai yra testuojami baterijų moduliai kurie yra sudaryti iš daugiau negu vienos baterijos. BMS panaudojimas nėra griežtas

reikalavimas, tačiau tokios sistemos apsaugo baterijas ir neleidžia baterijoms pasikrauti virš jų nustatytos įtampos ribos iš išsikrauti žemiau leistinos įtampos ribos. Pavyzdžiui, jeigu baterijų modulyje viena baterija pasikraus greičiau negu kitos, tai jiniai bus kraunama tol kol visos kitos nebus pilnai pakrautos ir tokiu atveju bus perkraunama ir taip bus greitai sugadinta. Tas pats įvyksta ir iškrovimo atveju, kai viena baterija jau yra iškrauta iki leistinos ribos, o kitos dar gali būti iškraunamos tai iškrovimas vyksta tol kol nebus iškrautas visas baterijų modulis, ko pasekoje kai kurios modulio baterijos jau bus iškaustos žemiau nustatytos įtampos ribos ir tai pablogins jų charakteristikas ir apsunkins sekantį pakrovimo procesą, be to baterijai išsikrovus žemiau jos leistinos įtampos ribos iš jos lieka mažai naudos, ji tik pablogins viso baterijų modulio darbą. BMS sistema atlieka svarbią baterijų balansavimo funkciją, todėl norint, kad baterijų modulis tarnautų geriau ir ilgiau yra labai svarbu naudoti BMS sistemas.

2.7. Skyriaus apibendrinimas

Išanalizavus ličio geležies fosfato baterijų struktūra ir veiksnius įtakojančius šios rūšies baterijų veikimą galima daryti išvada, jog blogas ličio jonų baterijų veikimas žemoje temperatūroje yra vienas iš techninių barjerų tokių baterijų panaudojimui elektra varomame transporte. Mokslinių straipsnių analizė parodė, kad LiFePO_4 baterijų talpumas smarkiai sumažėja žemoje temperatūroje, o ypač temperatūroje, žemesnėje negu $-20\text{ }^\circ\text{C}$. Talpumas sumažėja žemoje temperatūroje dėl apribotos elektrodų kinetikos, žemo elektrolito laidumo, žemo ličio jonų sklidimo ir aukšto elektrodo/elektrolito pasipriešinimo. Mokslinių straipsnių analizė parodė, kad galima pagerinti LiFePO_4 baterijų kokybę ir jų darbą prie žemos temperatūros optimizuojant jų elektrodų struktūras bei elektrolitą. Dėl šios priežasties yra poreikis ištirti įvairių gamintojų didelės talpos LiFePO_4 baterijas ir nustatyti kurio gamintojo baterijų darbo kokybę prie įvairių temperatūrų yra geriausia.

Atlikta mokslinių straipsnių analizė leido susipažinti su LiFePO_4 baterijų struktūra, baterijų formomis, darbinės temperatūros diapazonais ir pakrovimo/iškrovimo proceso ypatumais kas leidžia parinkti tyrimo objektą, aprašyti tyrimo metodiką, parinkti eksperimentinių tyrimų priemones, suprojektuoti eksperimentinių tyrimų standą ir atlikti LiFePO_4 baterijų iškrovimo proceso tyrimą.

III. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

3.1. Baterijų parinkimas

Kadangi, didelis baterijų skaičius padidina visos sistemos sudėtingumą ir kainą bei sumažina patikimumą, nes sistemoje atsiranda daugiau komponentų, vienas iš uždavinių elektra varomo transporto projektavime yra balanso tarp baterijų talpos ir celių kiekio nustatymas.

Vieni iš žinomiausių didelės talpos (*40Ah ir daugiau*) LiFePO₄baterijų gamintojų yra tokios kompanijos kaip CALB, Sinopoly, WinstonBattery, HiEnergy ir RealForce. Jų gaminamų įvairių talpų baterijų asortimentas pateikiamas žemiau (3 lentelė).

3 lentelė. Gamintojų celių asortimentas

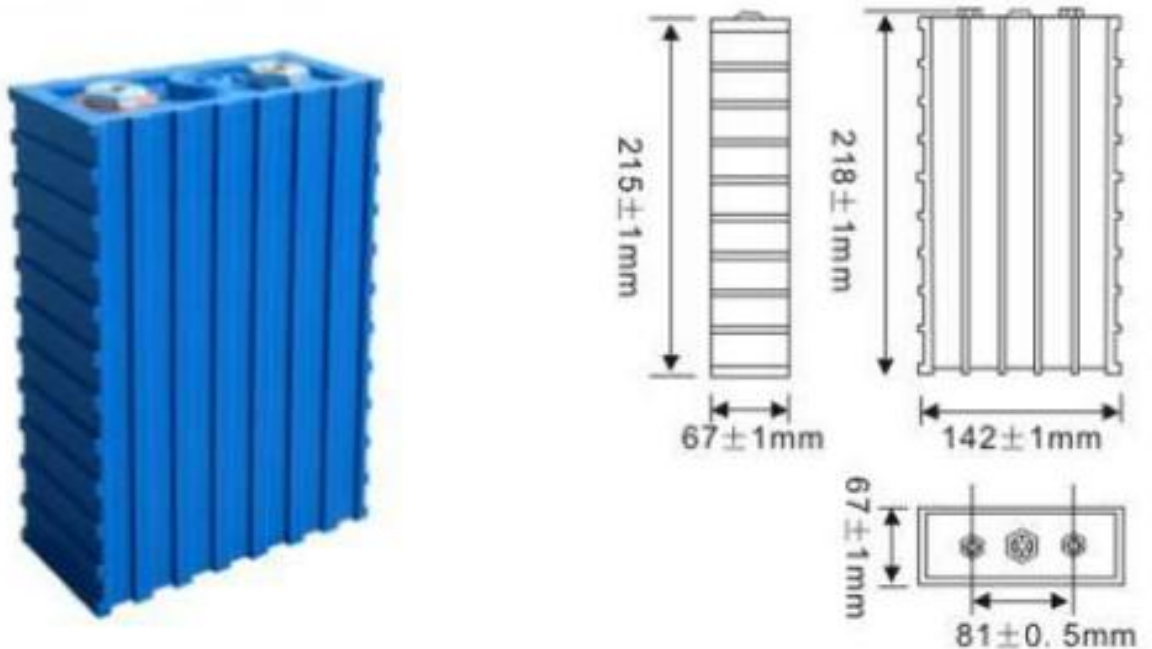
Talpa (Ah)\ Gamintojas	CALB	Sinopoly	Winston Battery	RealForce	HiPower
20					+
30					+
40	+	+	+		+
50					+
60	+	+	+		+
70	+				
80				+	
90		+	+		
100	+	+	+	+	+
120				+	
130	+				
160			+		+
180	+	+			+
200		+	+	+	+
220				+	
260		+	+		
300		+	+		
400	+	+	+		
600					
700		+	+		
1000		+	+		
10000			+		

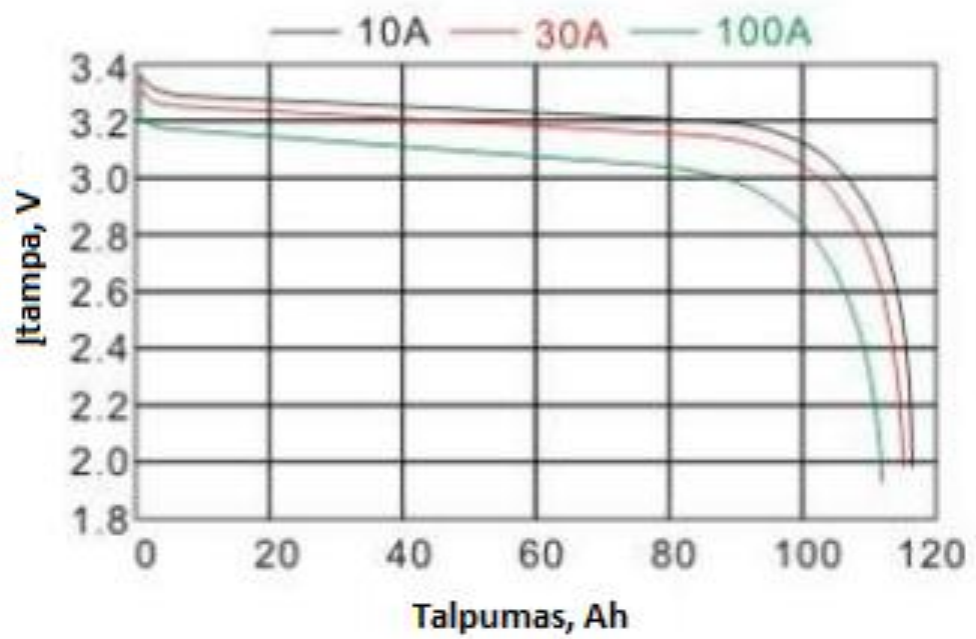
Visi iš pateiktų gamintojų savo asortimente turi 100 Ah talpos baterijas, todėl būtent tokio talpumo baterijos tiriamos vienodomis sąlygomis, kad galima būtų paliginti gamintojų produkcijos kokybę.

3.2. Tyrimo objektas

Tyrimo objektu yra parinktos trijų skirtingų gamintojų (CALB, Sinopoly ir Winston) LiFePO_4 baterijos po 100 Ah. Parinktų baterijų charakteristikos yra pateikiamos žemiau.

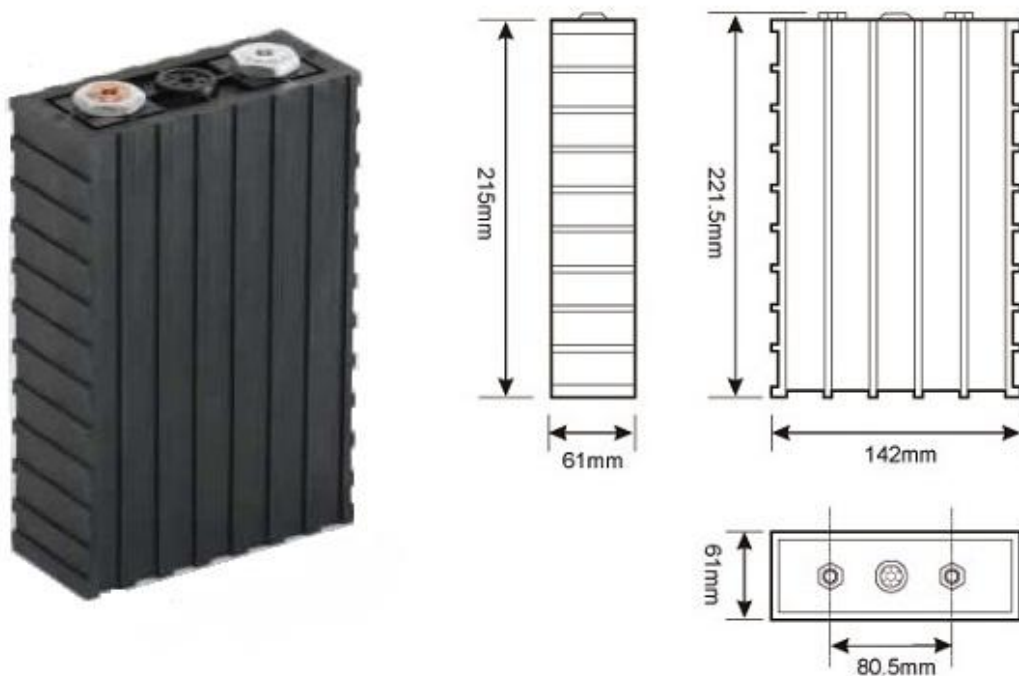
CALB 100Ah baterijos išmatavimai ir iškrovimo kreivės prie $+23^\circ\text{C}$ (15 pav.).

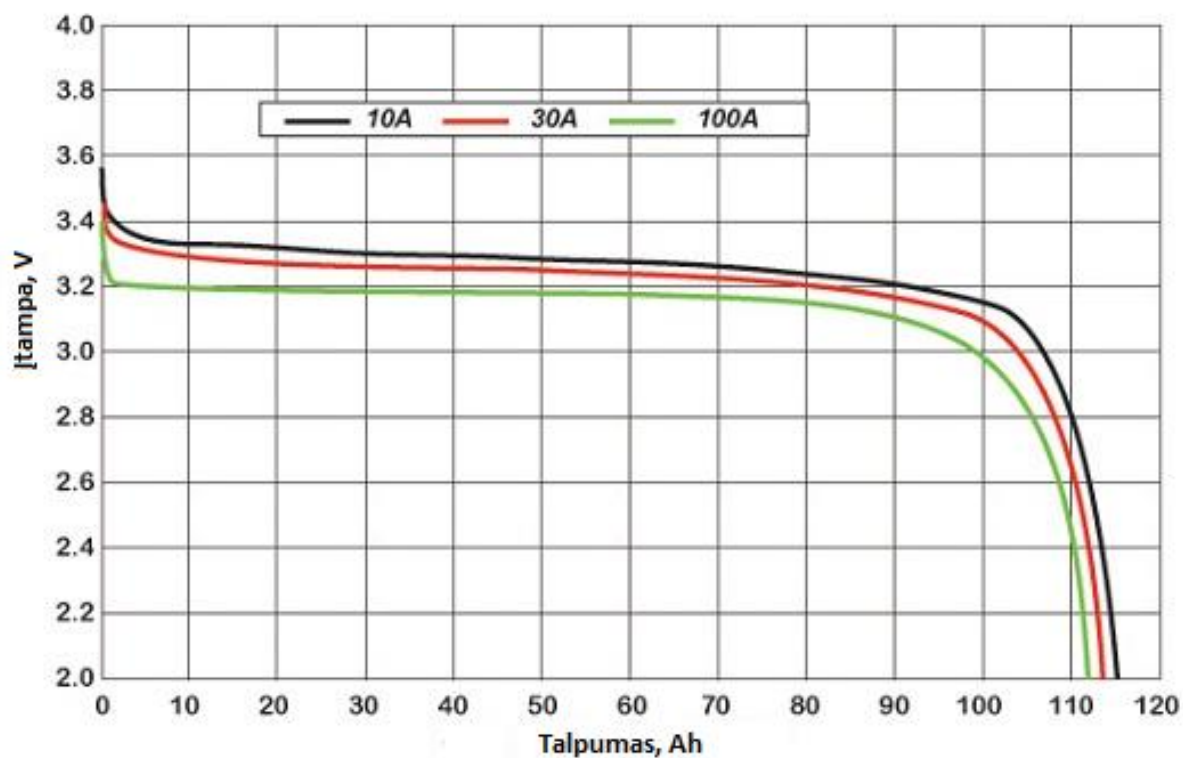




15 pav. 100Ah CALB baterijos charakteristikos (CALB, Inc. [interaktyvus])

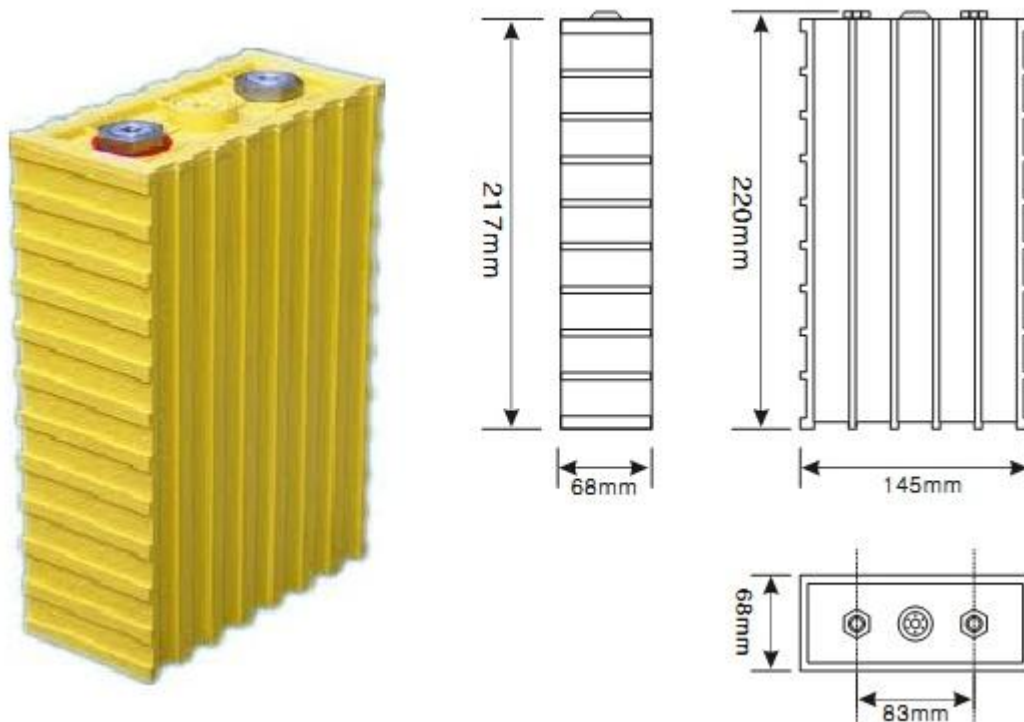
Sinopoly 100Ah baterijos išmatavimai ir iškrovimo kreivės prie +23°C (16 pav.);

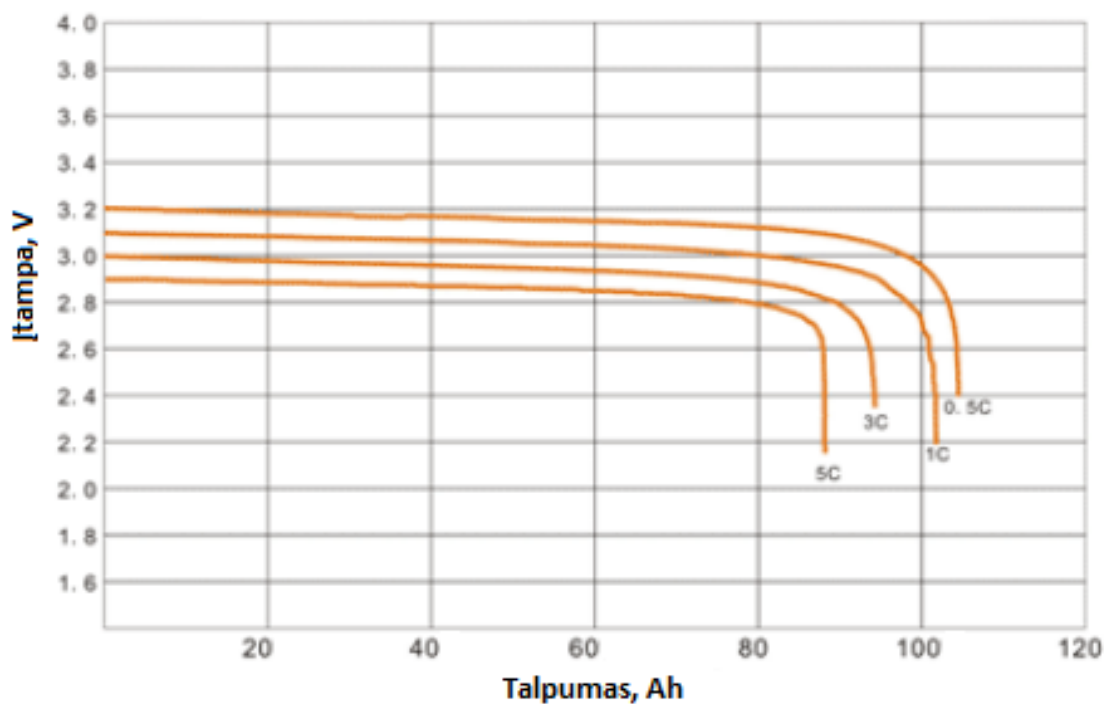




16 pav. 100Ah Sinopoly baterijos charakteristikos (Sinopoly Battery, Ltd. [interaktyvus])

WinstonBattery100Ah baterijos išmatavimai ir iškrovimo kreivės prie +23°C (17 pav.).





17 pav. 100Ah Winston baterijos charakteristikos (Winston Battery, Ltd. [interaktyvus])

Žemiau yra pateikiamos šių baterijų techninė specifikacija (4 lentelė):

4 lentelė. Parinktų baterijų techninė specifikacija

Gamintojas	Winston		CALB		Sinopoly	
	pakrovimas	iškrovimas	pakrovimas	iškrovimas	pakrovimas	iškrovimas
Nominalus talpumas	100Ah		100Ah		100Ah	
Nominali įtampa	3,2V		3,2V		3,2V	
Įtampos riba	4,0V	2,5V	3,6V	2,5V	3,8V	2,8V
Temperatūros diapazonas	-25°C~75°C	-25°C~75°C	0°C~45°C	-20°C~55°C	0°C~70°C	-20°C~70°C
Optimali srovė	≤50A	≤50A	≤30A	≤30A	≤30A	≤30A
Maksimali srovė	≤300A	≤300A	≤300A	≤400A	≤300A	≤300A

3.3. Eksperimentinių tyrimų metodika

Baterijų veikimas analizuojamas pakraunant jas prie normalios temperatūros (23 ± 2)°C ir iškraunant jas nuolatine srove prie normalios (23 ± 2)°C ir žemos temperatūros (-20 ± 2)°C.

Tyrimai atliekami esant sekančioms sąlygoms:

- standartinis pakrovimas: prie (23 ± 2)°C temperatūros, baterija pakraunama 30 A nuolatine srove tol kol pasiekama baterijos pakrovimo įtampos riba, po to pakrovimas tęsiamas nuolatine įtampa tol kol pakrovimo srovė bus < 3 A;
- iškrovimas prie normalios temperatūros: praėjus nemažiau 1 val. po baterijos pakrovimo prie (23 ± 2)°C temperatūros, baterija iškraunama 20 A nuolatine srove tol kol pasiekama baterijos iškrovimo įtampos riba;
- iškrovimas prie žemos temperatūros: po pakrovimo baterija pastatoma į šaldiklį ir praėjus nemažiau kaip 20 val. prie (-20 ± 2)°C temperatūros, baterija iškraunama 20 A nuolatine srove tol kol pasiekama baterijos iškrovimo įtampos riba;
- kiekviena baterija yra testuojama kelis kartus vienodomis sąlygomis ir iš atliktų bandymų rezultatų išvedamas vidurkis.

3.4. Eksperimentinių tyrimų įrenginiai ir priemonės

Eksperimentinio tyrimo stendo projektavimui reikalingi tokie įrenginiai ir priemonės:

- baterijų analizatorius;
- įrenginys galintis pakrauti baterijas nustatoma nuolatine srove ir nustatoma pastovia įtampa (*angl. CC/CV*);
- kompiuteris kurio pagalba bus fiksuojami ir apdorojami tyrimo metu gauti duomenys;
- šaldiklis;
- temperatūros jutiklis su skaitmeniu išėjimu, kuris gali būti pritvirtintas prie baterijos korpuso;
- multimetras;
- termometras kuris matuos šaldiklyje esama temperatūrą.

- sujungimo laidai ir kontaktai;
- saugumo priemonės – optinis dūmų daviklis su garsine signalizacija, miltelinis gesintuvas.

3.5. Priemonių analizė ir parinkimas

3.5.1. Baterijų analizatorius

Šio metu rinkoje siūloma labai daug įvairių baterijų analizatorių. Labai dažnas atvejis kai analizatorius gali būti naudojamas kaip baterijos pakrovėjas ir iškroviklis. Kadangi tyrimų metu bus testuojamos baterijos, kurių talpa yra 100 Ah, reikalingas toks analizatorius, kuris galės iškrauti bateriją kuo didesne nuolatine srove. Toliau yra pareikti analizatoriai kurie buvo atrinkti šiam tyrimui atlikti.

1) **iCharger 3010B** baterijų analizatorius gali pakrauti ir iškrauti įvairių tipų baterijas. Jis yra vienas iš galingiausių baterijų analizatorių siūlomų rinkoje. Jis taip pat pasižymi kompaktišku dizainu (18 pav.).



18 pav. iCharger 3010B baterijų analizatorius (iCharger New Zealand, Inc. [interaktyvus])

Šitas prietaisas pasižymi geromis bendromis charakteristikomis ir palaiko baterijos temperatūros stebėjimo funkciją, tačiau jis yra daugiau skirtas darbui su baterijos moduliais, kurie apjungia didelį kiekį mažos talpos baterijų. Be to, prietaisą negalima valdyti per kompiuterį ir

siūloma programinė įranga yra visai kito gamintojo ir yra pateikiama tik su pusiau anglų pusiau vokiečių kalbos vartotojo sąsaja. 5 lentelėje pateikiami prietaiso techniniai duomenys.

5 lentelė. iCharger 3010B prietaiso techniniai duomenys

Įvesties įtampa	4,5 – 38 V DC
DC pakrovimo srovės diapazonas	0,05 – 30,0 A
Iškrovimo srovės diapazonas	0,05 – 30,0 A
Maksimalus pakrovimo galios pajėgumas	1000 W
Maksimalus iškrovimo galios pajėgumas	80 W
Registracijos duomenų bylos maksimalus dydis	16 Mbit (31 Valandos)
Protingas temperatūros valdymas	Yra
Jungtis prie asmeninio kompiuterio	USB
Aušinimas	Yra
Svoris	750 g

2) **Cell Pro Power Lab 8** baterijų analizatorius taip pat gali pakrauti ir iškrauti įvairių tipų baterijas ir taip pat yra vienas iš galingiausių baterijų analizatorių siūlomų rinkoje (19 pav.).



19 pav. Cell Pro Power Lab 8 baterijų analizatorius (Revolectrix Group [interaktyvus]).

Šitas prietaisas pasižymi geromis bendromis charakteristikomis, tačiau jis yra skirtas darbu su baterijos moduliais, kurie apjungia didelį skaičių mažos talpos baterijų. Prietaisą galima valdyti naudojant kompiuterį, o siūloma programinė įranga leidžia nustatyti daugybę įvairių pakrovimo ir

iškrovimo parametrų. Vienas iš šio gaminio trūkumų yra tai, jog jis ne palaiko testuojamos baterijos temperatūros stebėjimo funkcijos. 6 lentelėje yra pateikiami prietaiso techniniai duomenys.

6 lentelė. Cell Pro Power Lab 8 prietaiso techniniai duomenys

Įvesties įtampa	10 – 32V DC
DC pakrovimo srovės diapazonas	0.01 – 40.0 A
Iškrovimo srovės diapazonas	0.01 – 40.0 A
Maksimalus pakrovimo galios pajėgumas	1344W (@ >25V; 500W @ 12V)
Maksimalus iškrovimo galios pajėgumas	100 W
Registracijos duomenų bylos maksimalus dydis	Neapribojamas
Protingas temperatūros valdymas	Yra
Jungtis prie asmeninio kompiuterio	USB
Aušinimas	Yra
Svoris	1140 g

3) **CBA III Pro** yra nustatomų iškrovimo parametrų profesionalus baterijų analizatorius pasižymintis kompaktišku dizainu (20 pav.).



20 pav. CBA III Pro baterijų analizatorius (West Mountain Radio, Inc. [interaktyvus]).

Šitas prietaisas yra sukurtas profesionaliam baterijų testavimui. Jis sugeba iškrauti visų tipų baterijas nuolatine srove ir yra tiekiamas su profesionalia programine įranga, kuri leidžia nustatyti

įvairius iškrovimo parametrus ir detaliai analizuoti baterijos būklę jos iškrovimo metu. Prietaisas sugeba iškrauti baterijas nustatyta nuolatine srove 0,01 – 40 amperų diapazone. Taip pat yra galimybė prie prietaiso prijungti temperatūros jutiklį ir stebėti testuojamos baterijos temperatūros pokyčius jos testavimo metu, o tiekiamą profesionali programinė įranga leidžia atlikti prietaiso kalibravimą. 7 lentelėje yra pateikiami prietaiso techniniai duomenys.

7 lentelė. CBA III Pro prietaiso techniniai duomenys

Įvesties įtampa	5 V DC
Iškrovimo srovės diapazonas	0.01 – 40.0 A
Maksimalus iškrovimo galios pajėgumas	150W
Registracijos duomenų bylos maksimalus dydis	Neapribojamas
Protingas temperatūros valdymas	Yra
Jungtis prie asmeninio kompiuterio	USB
Aušinimas	Yra

8 lentelėje yra pateikimas visu trijų aukščiau išvardintu baterijų analizatorių palyginimas.

8 lentelė. Baterijų analizatorių palyginimas

Analizatorius	iCharger 3010B	Cell Pro Power Lab 8	CBA III Pro
Maksimali iškrovimo srovė	30 A	10 A	40 A
Maksimali iškrovimo galia	80 W	100 W	150 W
Registracijos duomenų bylos maksimalus dydis	16 Mbit	Neapribojamas	Neapribojamas
Protingas temperatūros valdymas	Yra	Yra	Yra
Valdymas per USB	Nėra	Yra	Yra
Kokybiška programinė įranga	Ne	Taip	Taip
Baterijų temperatūros stebėjimas	Yra	Nėra	Yra
Galimybė padidinti iškrovimo srovę	Nėra	Yra, iki 40 A	Yra, iki 1600 A
Galimybė padidinti iškrovimo galią	Nėra	Yra, iki 1344 W	Yra, iki 2150 W

Lyginant visus tris aukščiau išvardintus baterijų analizatorius, CBA III Pro išrinktas kaip pats geriausias analizatorius, su kurio pagalba galima atlikti 100Ah talpos LiFePO₄ baterijų iškrovimo tyrimus.

3.5.2. Baterijų pakrovėjas

Kadangi LiFePO₄ baterijos turi būti pakraunamos CC/CV režimu, reikalingas toks el. energijos maitinimo šaltinis, kuris sugebės kontroliuoti baterijos įtampą ir persijungti iš nuolatinės srovės režimo į nuolatinės įtampos režimą prieš baterijai pasiekiant aukščiausią leistiną įtampą. Šio metu rinkoje siūloma labai daug įvairių el. energijos maitinimo šaltinių. Toliau yra pareikti el. energijos maitinimo šaltiniai kurie buvo atrinkti šiam tyrimui atlikti.

1) **Tenma 72-7670** yra populiarus el. energijos maitinimo šaltinis skirtas savaeigių elektroninių prietaisų ir komunikacijos įrangos el. energijos aprūpinimui. Platus nustatomos nuolatinės įtampos diapazonas (3 - 15 V) leidžia patogiai naudoti prietaisą įvairios el. įrangos maitinimui. Prietaisas pasižymi kompaktišku dizainu, gali maitinti prietaisus iki 25 A stiprumo nuolatine srove ir yra aprūpintas tylią aušinimo sistema, kuri garantuoja prietaiso patikimumą ir ilgalaikį veikimą (21 pav.).



21 pav. Tenma 72-7670 el. energijos maitinimo šaltinis (MCM Electronics, Inc. [interaktyvus]).

9 lentelėje yra pateikiamos prietaiso bendros charakteristikos.

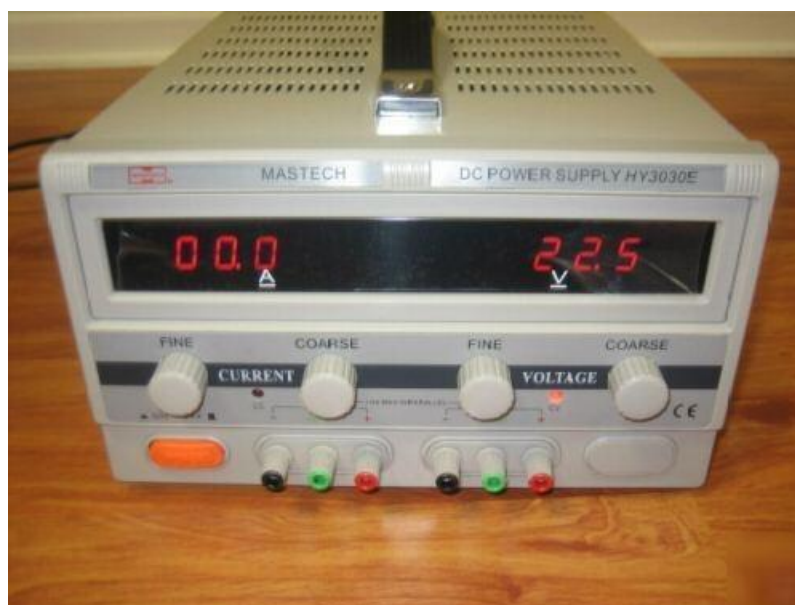
9 lentelė. Tenma 72-7670 el. energijos maitinimo šaltinio charakteristikos

Išėjimo įtampa	3-15 V DC
Išėjimo įtampos tikslumas	0,1 V
Išėjimo srovė	25 A

Išėjimo srovės tikslumas	0,1 A
Vienų metu rodo išėjimo įtampa ir išėjimo srovė	Taip
Atmintis	Nėra
Maitinimas	115 V AC 60 Hz
Svoris	3 kg

Pagal savo charakteristikas prietaisas pasižymi geromis bendromis charakteristikomis, tačiau išėjimo srovė nėra reguliuojama ir prietaisas yra skirtas naudojimui šalyse kur yra 115 V AC, 60 Hz maitinimas.

2) **Mastech HY3030E** yra aukštos nuolatinės srovės, profesionalus, stabilus ir galingas reguliuojamas el. energijos šaltinis pagamintas Mastech firmos, kurio maksimali galia yra 900 W. Šitas aukštos kokybės el. energijos maitinimo šaltinis suteikia galimybę reguliuoti tiek išėjimo įtampą intervale nuo 0 iki 30 voltų, tiek išėjimo srovę intervale nuo 0 iki 30 amperų. Prietaisas vienu metu rodo išėjimo įtampą ir išėjimo srovę (22 pav.).



22 pav. Mastech HY3030E el. energijos maitinimo šaltinis

10 lentelėje yra pateikiamos prietaiso bendros charakteristikos.

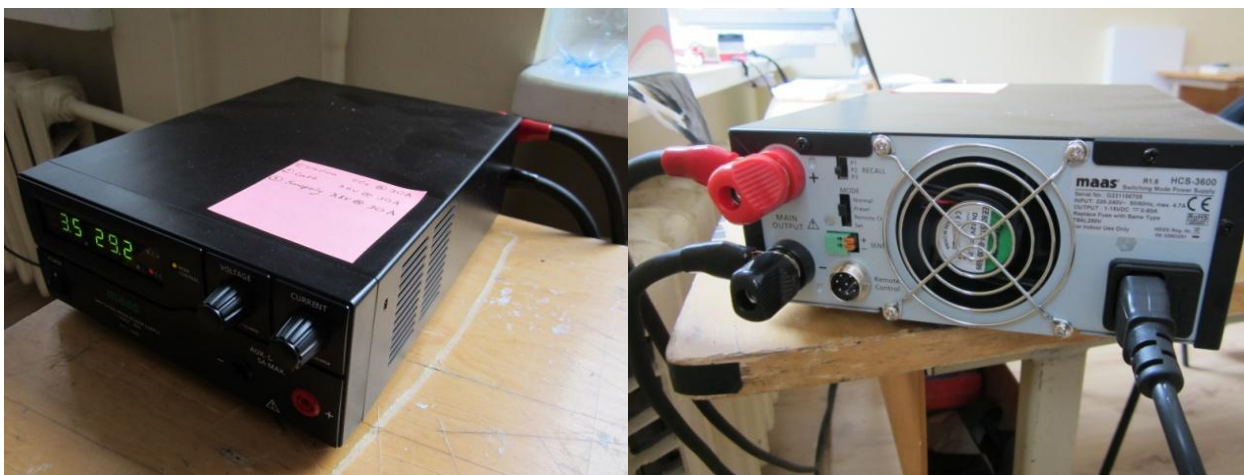
10 lentelė. Mastech HY3030E el. energijos maitinimo šaltinio charakteristikos

Išėjimo įtampa	0-30 V DC
Išėjimo įtampos tikslumas	0,1 V

Išėjimo srovė	0-30 A
Išėjimo srovės tikslumas	0,1 A
Vienų metu rodo išėjimo įtampa ir išėjimo srovė	Taip
Atmintis	Nėra
Maitinimas	115 V AC 60 Hz
Svoris	7,3 kg

Nors prietaisas pasižymi geromis charakteristikomis, tačiau jis nepasižymi kompaktišku dizainu, yra sunkus palyginus su savo analogais ir yra skirtas naudojimui šalyse kur yra 115 V AC, 60 Hz maitinimas.

3) **Maas HCS 3600** prietaisas yra antrinis kintamo režimo el. energijos maitinimo šaltinis su įterptu padidinto dažnio impulsinės įtampos keitikliu ir nustatomos įtampos ir srovės funkcija. Šitas prietaisas naudoja sinusinę 220 V pirminio maitinimo šaltinio įtampą. Prietaisas leidžia nustatyti reikalingą nuolatinę įtampą 1 - 15 voltų diapazone ir nuolatinę srovę 0 - 60 amperų diapazone^[14]. Kadangi LiFePO₄ baterijos turi būti pakraunamos CC/CV režimu ir skirtingų gamintojų baterijos pakraunamos iki skirtingų įtampų, šitas prietaisas puikiai tinka baterijos pakrovimui dėl savo plataus parametrų nustatymo diapazono ir dėl to, kad jis veikia CC/CV režimu (23 pav.).



23 pav. HCS-3600 el. energijos maitinimo šaltinis

11 lentelėje yra pateikiamos prietaiso bendros charakteristikos (11 lentelė).

11 lentelė. HCS-3600 el. energijos maitinimo šaltinio charakteristikos

Išėjimo įtampa	1-15 V DC
Išėjimo įtampos tikslumas	0,1 V

Išėjimo srovė	0-60 A
Išėjimo srovės tikslumas	0,1 A
Vienų metu rodo išėjimo įtampa ir išėjimo srovė	Taip
Atmintis	3 nustatymai
Maitinimas	200-240 V AC 50/60 Hz
Svoris	3,4 kg

Iš visu išvardintų prietaisų, HCS-3600 išrinktas kaip pats tinkamiausias prietaisas atlikti baterijų pakrovėjo funkciją dėl savo plataus parametrų nustatymo diapazono, daugybės papildomų funkcijų, dėl to kad jis veikia CC/CV režimu ir gali būti maitinamas nuo 200-240 V AC 50/60 Hz tinklo.

3.5.3. Kita įranga

Ekperimentinių tyrimų stendui suprojektuoti ir tyrimams atlikti buvo panaudota sekanti papildoma įranga:

- 1) nešiojamas kompiuteris su dviejų branduolių 2.00 GHz procesoriumi, 160GB kietuoju disku, 2 GB operatyvine atmintimi ir 32-bit Windows 7 operacine sistema;
- 2) šaldiklis sugebantys šaldyti iki $(-35 \pm 2) ^\circ\text{C}$ laipsnių;
- 3) magnetinis baterijų temperatūros jutiklis su skaitmeniu išėjimu, kuris yra suderinamas su CBA III Pro baterijų analizatoriumi (24 pav.);
- 4) universalus multimetras UNI-T UT33D (25pav);
- 5) termometras-higrometras TTH-1115B, kurio drėgnumo matavimo ribos yra 10% ~ 99% RH (tikslumas $\pm 5\%$, padala 1% RH) ir temperatūros matavimo ribos yra $-50^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ (tikslumas $\pm 1^\circ\text{C}$, padala 0.1°C) (26 pav.);



24 pav. Magnetinis baterijų temperatūros jutiklis



25 pav. Multimetras UNI-T UT33D



26 pav. Termometras-higrometras TTH-1115B

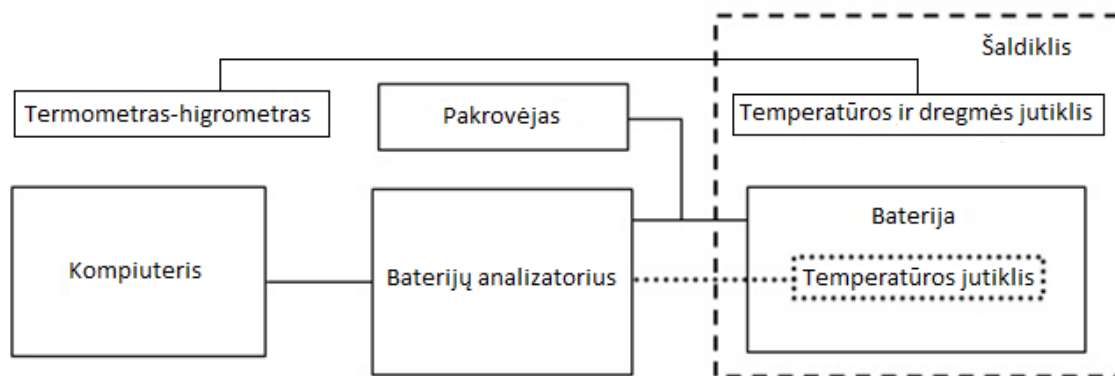
6) variniai kontaktai ir 25 mm² skerspjūvio ploto variniai sujungimo laidai (27 pav.)



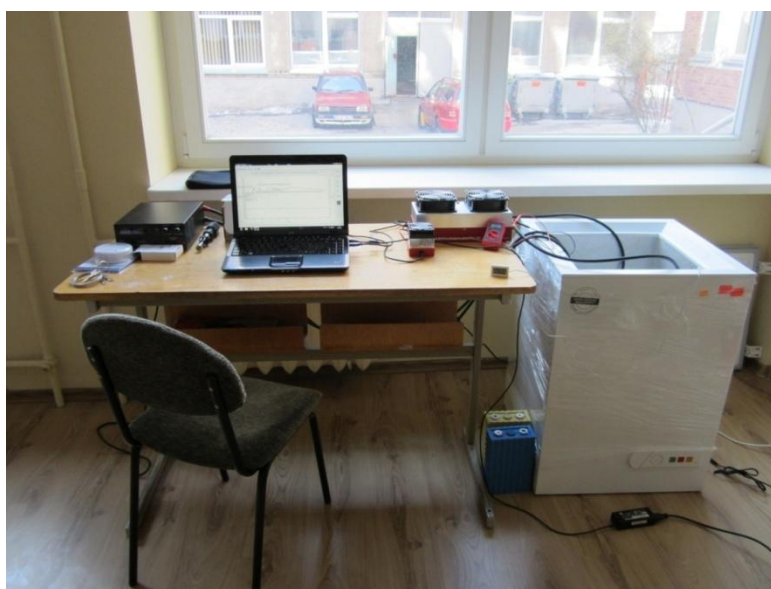
27 pav. Variniai kontaktai ir 25 mm² skerspjūvio ploto variniai sujungimo laidai

3.6. Eksperimentinių tyrimų stendo projektavimas

Tyrimo stendo projektavimo metu daug dėmesio skirta universalumui. Vienas iš reikalavimų yra stendo pritaikomumas skirtingų akumuliatorių tyrimams atlikti. Atsižvelgiant į tai, parinkti tik tokie komponentai kuriuos nereikia keisti norint ištirti skirtingų tipų baterijas (arba naujai atsiradusius baterijų tipus). Baterijų analizatoriaus iškrovimo parametrų ribos gali būti išplėstos ateityje prijungiant papildomus stiprintuvus. Baterijų pakrovėjas pasižymi labai plačiu parametrų nustatymo diapazonu kas teoriškai leidžia pakrauti bet kokia bateriją ar baterijų modulį kurie yra pakraunami CC/CV režimu. Žemiau yra pateikiama eksperimentinių tyrimų stendo blokinė schema (28 pav.) ir stendo nuotrauka iškaro po to kai jis buvo surinktas iš visų komponentų (29 pav.).



28 pav. Eksperimentinių tyrimų stendo blokinė schema



29 pav. Eksperimentinių tyrimų stendas

Realiai stendo naudojimo metu buvo ne vieną kartą keičiamas įrangos išdėstymas atsižvelgiant į įvairius faktorius, tokius kaip: atstumas nuo maitinimo šaltinių, aparatūros ir sujungimo laidų ilgiai, patogios vietos įrangai derinimas ir kt.

Tam, kad būtų įmanoma praveisti storus sujungimo laidus į šaldymo kamerą tokiu būdu, kad į ją patektų kuo mažiau šilumos iš išorės, yra padarytas specialus šaldiklio dangtis iš 10cm storio polistireninio putplasčio lakšto (30 pav.). Taip pat dėl saugumo reikalavimų, eksperimentinių tyrimų stendo patalpa buvo aprūpinta optiniu dūmu davikliu ir milteliniu gesintuvu. Suprojektuoto tyrimų stendo pagalba galima atlikti įvairių baterijų iškrovimo proceso prie žemos (iki $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$) temperatūros tyrimus.



30 pav. Pagamintas specialus šaldiklio dangtis

IV. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Eksperimentinių tyrimų prie skirtingų temperatūrų metu buvo nustatytos pagrindinės įvairių baterijų iškrovimo charakteristikos:

- nominalus talpumas;
- nominali galia;
- iškrovimo laikas.

4.1. Baterijų iškrovimo parametrų nustatymas prie skirtingų temperatūrų

Mokslinių straipsnių apžvalga parodė, kad ličio geležies fosfato baterijų darbinės įtampos diapazonas yra nuo 4,2 V iki 2,0 V. Tačiau skirtingi gamintojai savo gaminamoms baterijoms nurodo skirtingus darbinės įtampos diapazonus norint apsaugoti baterijas ir prailginti jų tarnavimo laiką. Eksperimentiniai tyrimai yra atlikti pakraunant ir iškraunant tiriamas baterijas atsižvelgiant į gamintojų nurodomas darbinės įtampos ribas. Tiriamų baterijų darbinės įtampos ribos yra pateikiamos 12 lentelėje.

12 lentelė. Tiriamų baterijų darbinės įtampos ribos

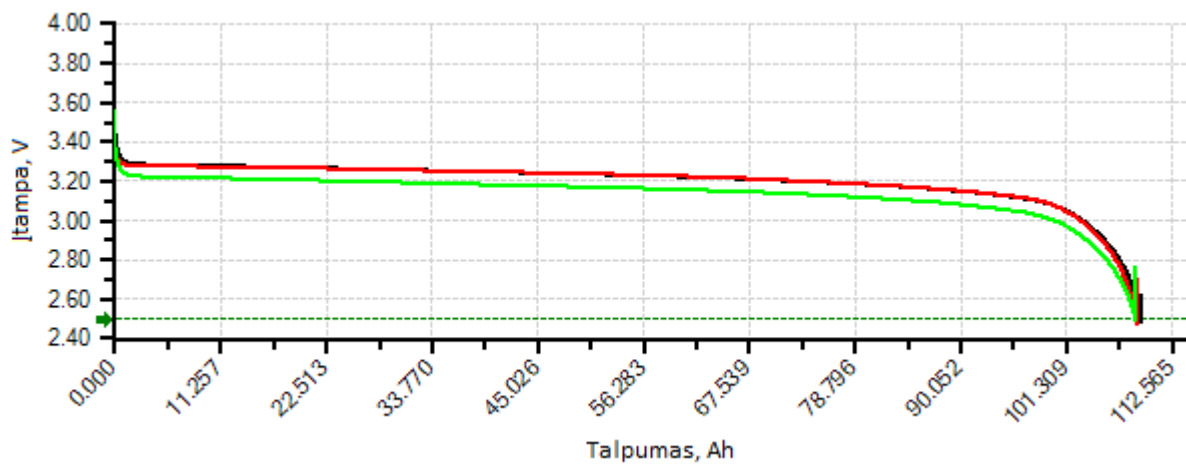
Gamintojas	Winston		CALB		Sinopoly	
	pakrovimas	iškrovimas	pakrovimas	iškrovimas	pakrovimas	iškrovimas
Įtampos riba	4,0 V	2,5 V	3,6 V	2,5 V	3,8 V	2,8 V

4.1.1. Eksperimentiniai baterijų iškrovimo proceso tyrimai prie (23±2) °C

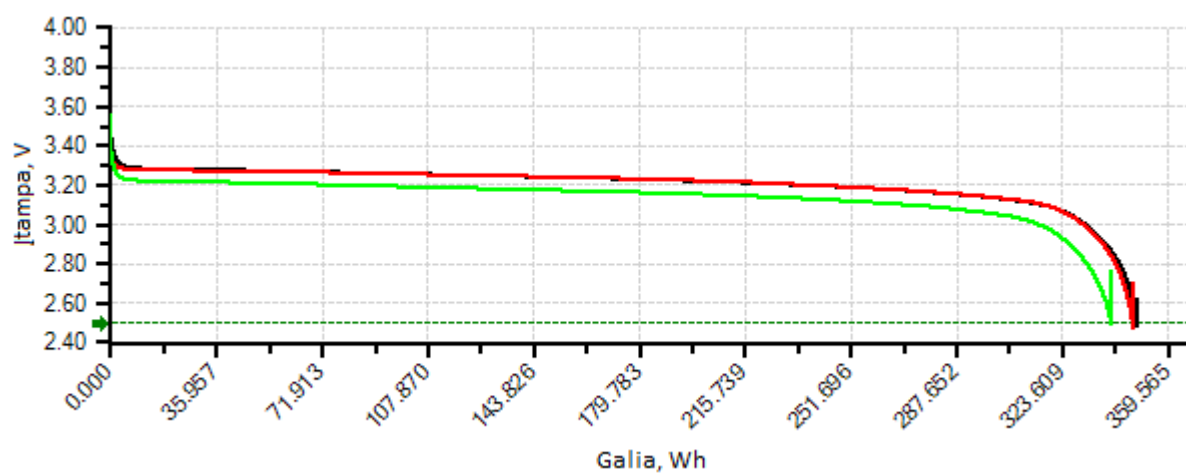
4.1.1.1. Winston baterijos tyrimai prie (23±2) °C

Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23±2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 4,0 V įtampos ribos ir praėjus nemažiau 1 val. po pakrovimo yra iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,5 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti

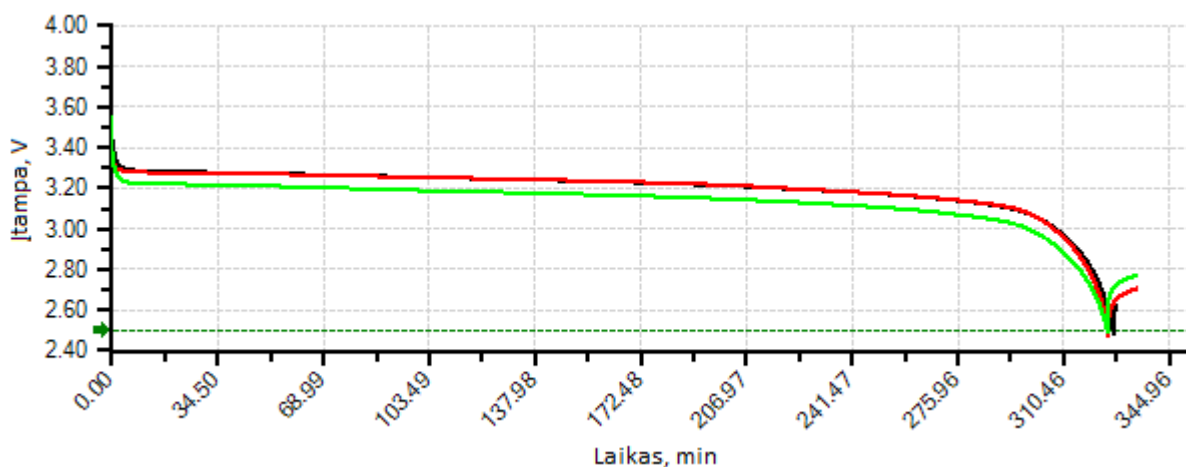
rezultatai yra pateikti 31-33 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 13 lentelėje.



31 pav. Nustatytas Winston baterijos talpumas prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$



32 pav. Nustatyta Winston baterijos galia prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$



33 pav. Nustatytas Winston baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C

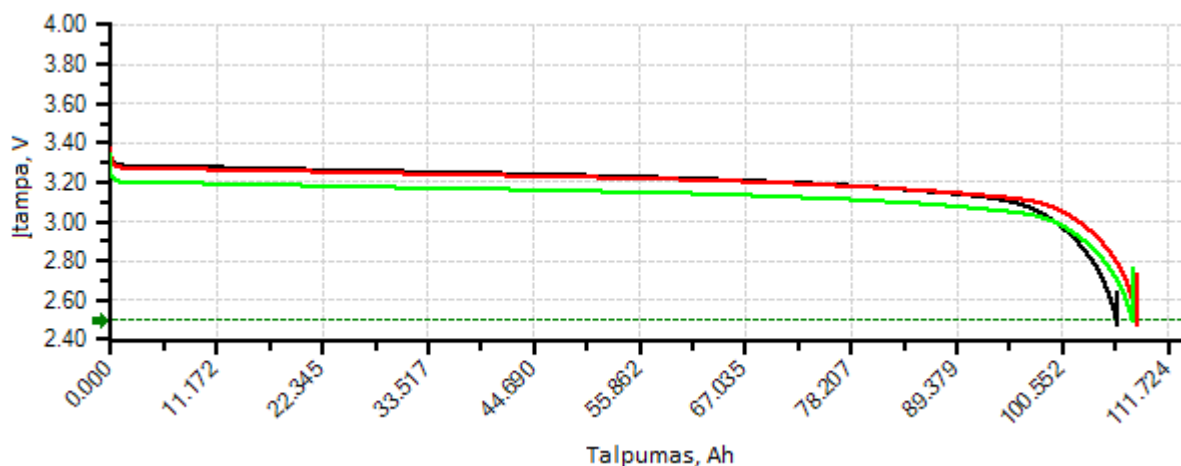
13 lentelė. Winston baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,56	109,393	349,432	327	3,01
2	raudona	3,41	108,882	347,721	325	2,89
3	žalia	3,57	108,767	340,516	325	2,87
Vidurkis:		3,51	109,014	345,889	326	2,92

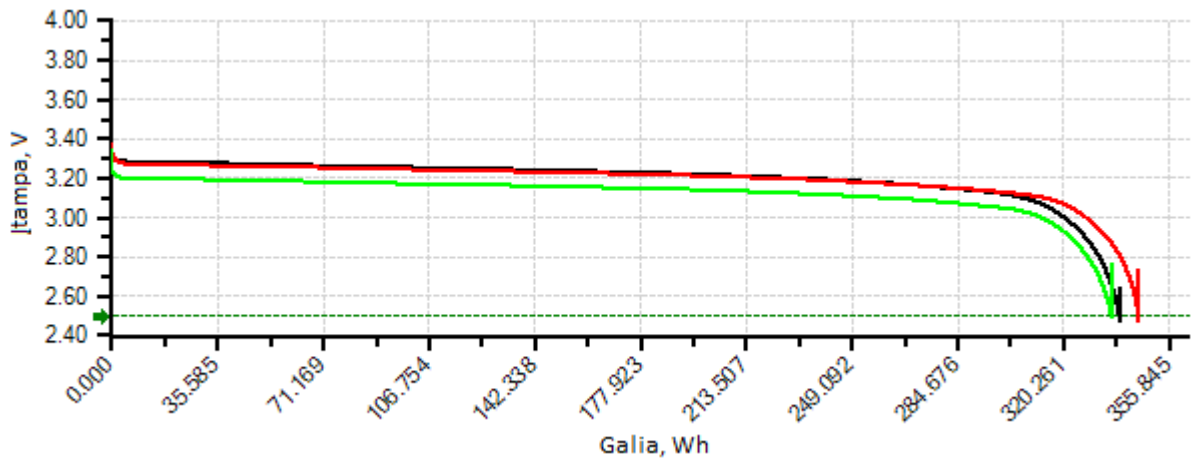
Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie normalios (23±2) °C temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, vidutinis Winston baterijos talpumas yra **109,014 Ah**, vidutinė galia yra **345,889 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,5 V įtampos ribos yra **326** minutės.

4.1.1.2. CALB baterijos tyrimai prie (23±2) °C

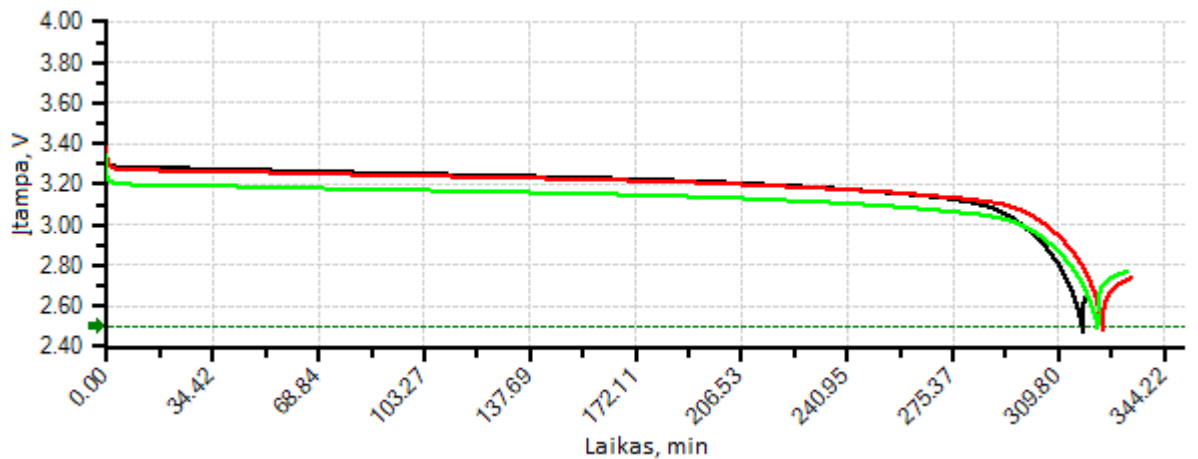
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23±2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos ir praėjus nemažiau 1 val. po pakrovimo yra iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,5 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 34-36 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 14 lentelėje.



34 pav. Nustatytas CALB baterijos talpumas prie (23±2) °C



35 pav. Nustatyta CALB baterijos galia prie (23±2) °C



36 pav. Nustatytas CALB baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C

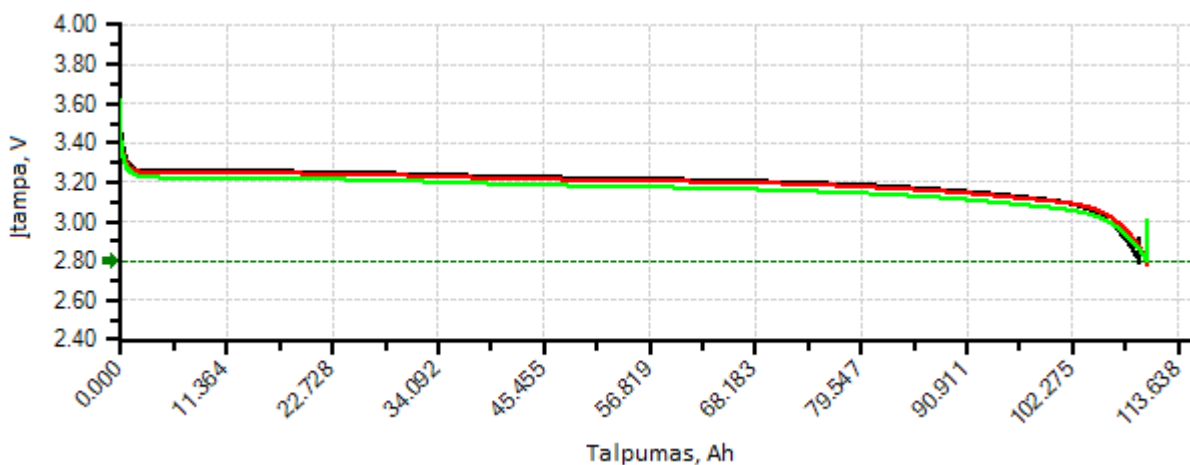
14 lentelė. CALB baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,35	106,336	339,354	317	2,93
2	raudona	3,39	108,575	345,816	324	2,95
3	žalia	3,35	108,016	336,679	322	2,92
Vidurkis:		3,36	107,642	340,616	321	2,93

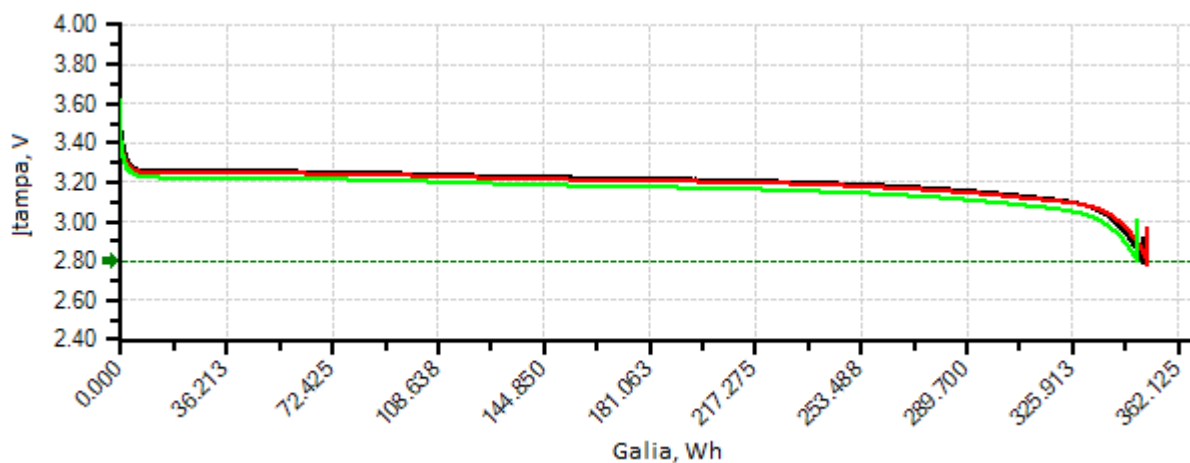
Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie normalios (23 ± 2) °C temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, vidutinis CALB baterijos talpumas yra **107,642 Ah**, vidutinė galia yra **340,616 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,5 V įtampos ribos yra **321** minutės.

4.1.1.3. Sinopoly baterijos tyrimai prie (23 ± 2) °C

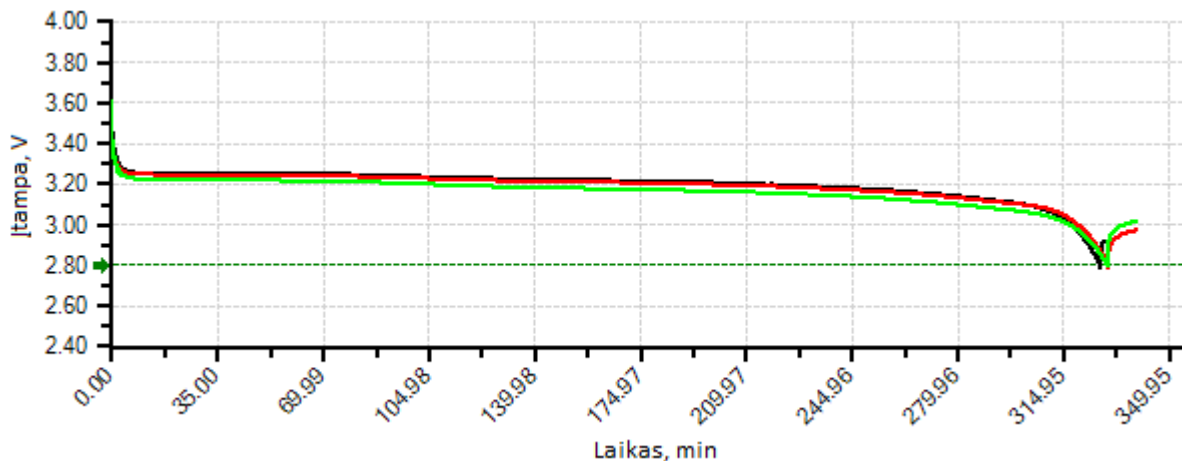
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23 ± 2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatinė srove iki 3,8 V įtampos ribos ir praėjus nemažiau 1 val. po pakrovimo yra iškrauta 20 A stiprumo nuolatinė srove iki 2,8 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 37-39 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 15 lentelėje.



37 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos talpumas prie (23 ± 2) °C



38 pav. Nustatyta Sinopoly baterijos galia prie (23 ± 2) °C



39 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos iškrovimo laikas prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$

15 lentelė. Sinopoly baterijos iškrovimo proceso prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,61	109,546	350,125	327	3,13
2	raudona	3,52	110,436	351,919	330	3,09
3	žalia	3,63	110,386	348,488	329	3,09
Vidurkis:		3,58	110,122	350,177	329	3,10

Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie normalios $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, vidutinis Sinopoly baterijos talpumas yra **110,122 Ah**, vidutinė galia yra **350,177 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,8 V įtampos ribos yra **329** minutės.

4.1.1.4. Eksperimentinių tyrimų prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ rezultatų palyginamoji analizė ir apibendrinimas

Analizuojant visų trijų baterijų tyrimo metų gautus rezultatus yra išvedami kiekvienos baterijos rezultatų vidurkiai. Analizės metu yra palygintos tokios baterijų charakteristikos kaip vidutinis nominalus talpumas, vidutinė nominali galia ir vidutinis iškrovimo laikas. Atliktų bandymų rezultatų vidurkių palyginimas yra pateiktas 16 lentelėje.

16 lentelė. Baterijų iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų vidurkių apibendrinimas

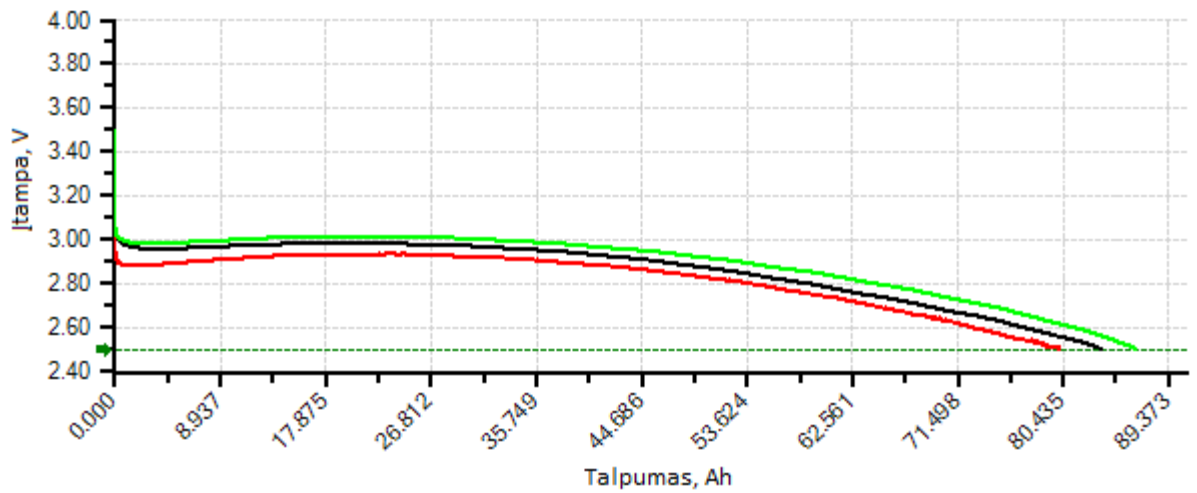
Baterija	Vidurkiai				
	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
Winston	3,51	109,014	345,889	326	2,92
CALB	3,36	107,642	340,616	321	2,93
Sinopoly	3,58	110,122	350,177	329	3,10

Lyginant trijų gamintojų baterijų eksperimentinių tyrimų metų gautų rezultatų vidurkius, galima teigti, kad prie (23±2)°C temperatūros geriausi rezultatai gauti su Sinopoly baterija, kuriai buvo nustatytas **110,122** Ah vidutinis talpumas, **350,177** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **329** minutes. Vidutinis rezultatas gautas su Winston baterija, kuriai buvo nustatytas **109,014** Ah vidutinis talpumas, **345,889** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **326** minutes. Prasčiausias rezultatas gautas su CALB baterija, kuriai buvo nustatytas **107,642** Ah vidutinis talpumas, **340,616** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **321** minutes.

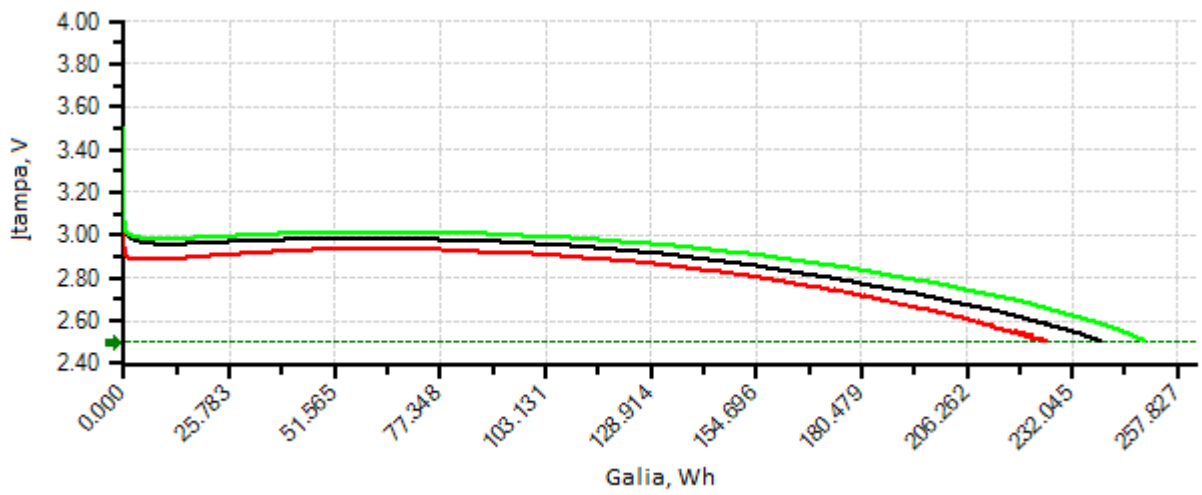
4.1.2. Eksperimentiniai baterijų iškrovimo tyrimai prie (-20±2) °C

4.1.2.1. Winston baterijos tyrimai prie (-20±2) °C

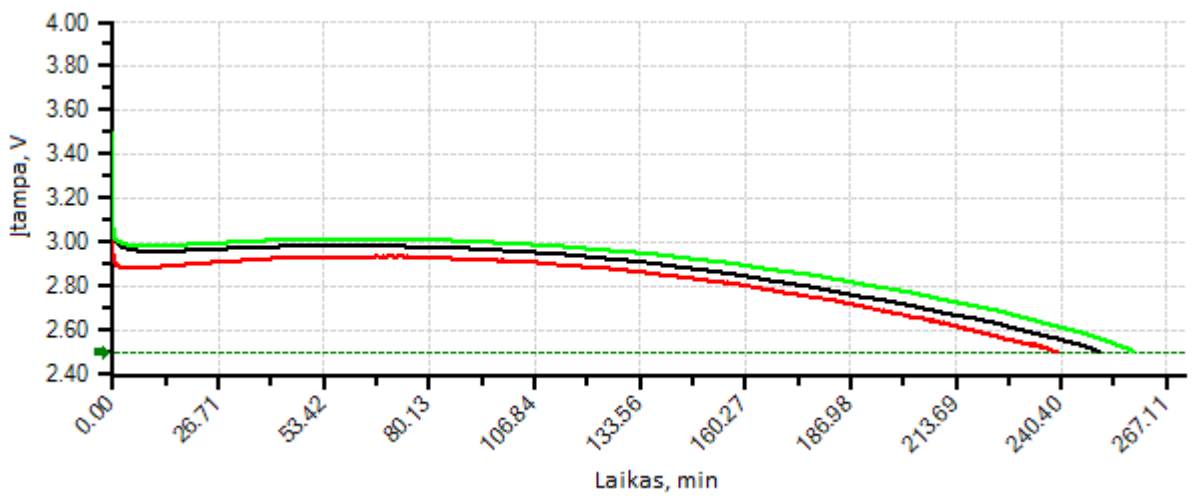
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23±2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 4,0 V įtampos ribos. Po pakrovimo baterija pastatyta į šaldiklį ir praėjus nemažiau kaip 20 val. prie žemos (-20±2) °C temperatūros, baterija iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,5 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 40-42 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 17 lentelėje.



40 pav. Nustatytas Winston baterijos talpumas prie (-20±2)°C



41 pav. Nustatyta Winston baterijos galia prie (-20±2)°C



42 pav. Nustatytas Winston baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C

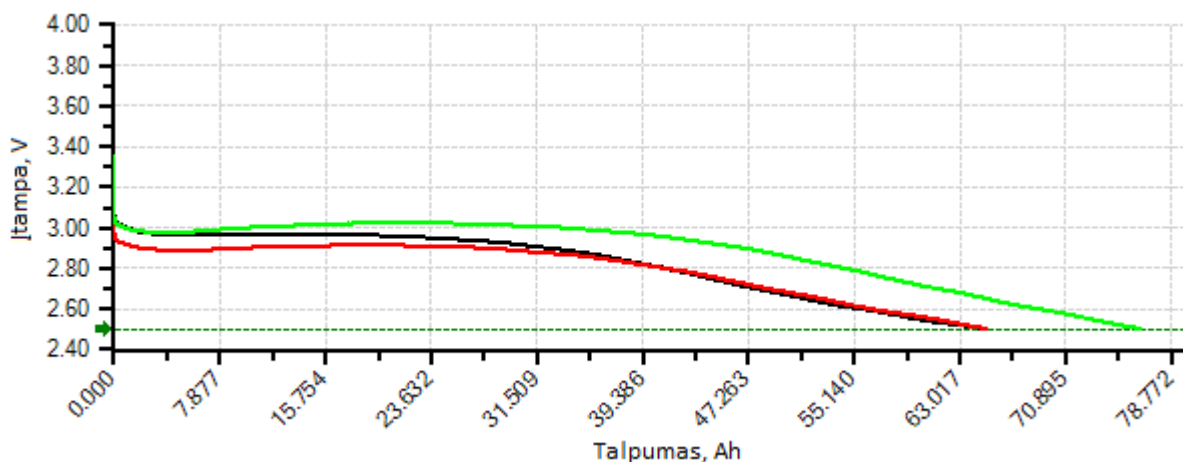
17 lentelė. Winston baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,53	83,871	239,537	250	3,29
2	raudona	3,44	80,086	225,856	239	3,28
3	žalia	3,50	86,848	250,561	259	3,26
Vidurkis:		3,49	83,602	238,651	249	3,28

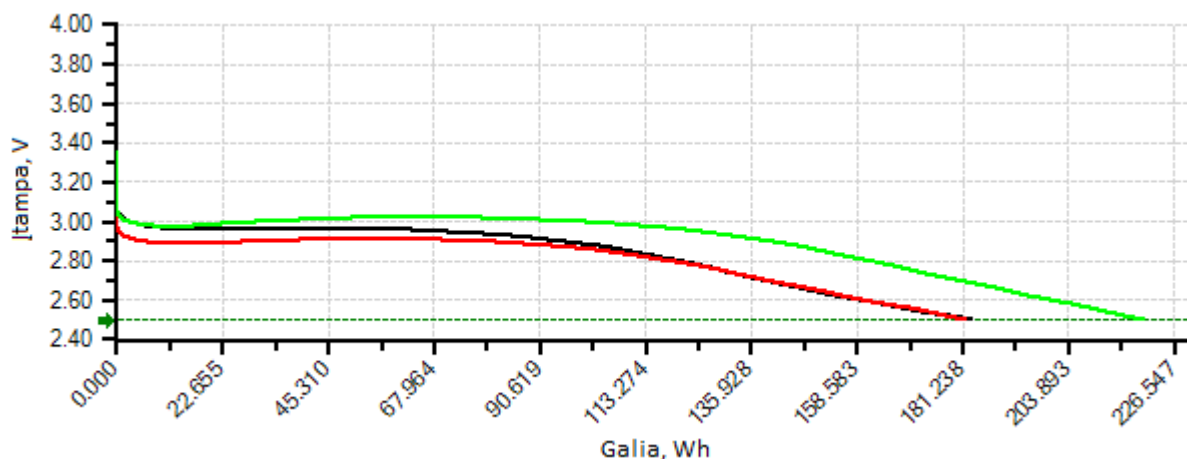
Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie žemos (-20±2) °C temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, vidutinis Winston baterijos talpumas yra **83,602 Ah**, vidutinė galia yra **238,651 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,5 V įtampos ribos yra **249** minutės.

4.1.2.2. CALB baterijos tyrimai prie (-20±2) °C

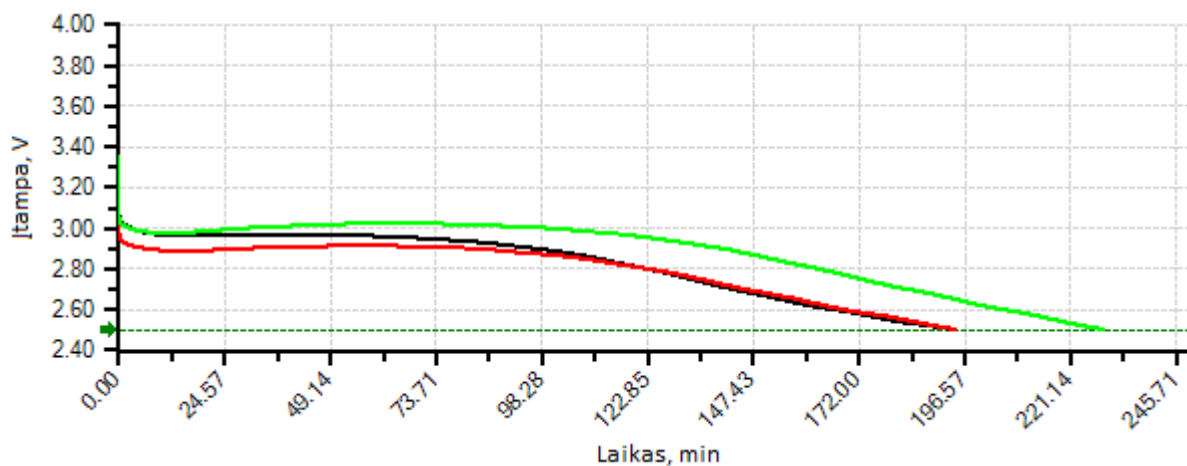
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23±2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos. Po pakrovimo baterija pastatyta į šaldiklį ir praėjus nemažiau kaip 20 val. prie žemos (-20±2) °C temperatūros, baterija iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,5 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 43-45 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 18 lentelėje.



43 pav. Nustatytas CALB baterijos talpumas prie (-20±2)°C



44 pav. Nustatyta CALB baterijos galia prie (-20±2)°C



45 pav. Nustatytas CALB baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C

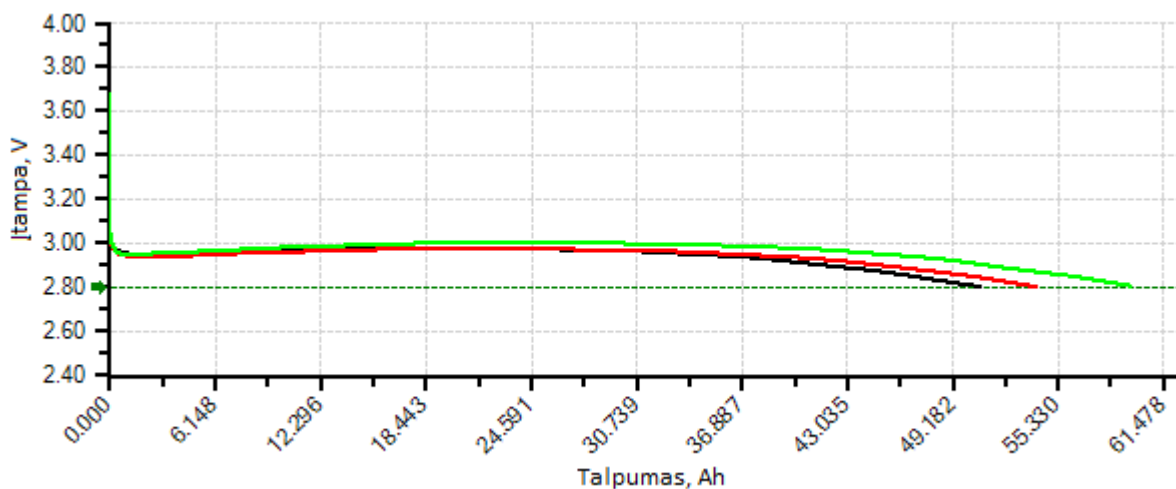
18 lentelė. CALB baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,33	64,934	183,361	194	3,28
2	raudona	3,36	65,002	181,946	194	3,28
3	žalia	3,37	76,552	220,161	228	3,28
Vidurkis:		3,35	68,829	195,156	205	3,28

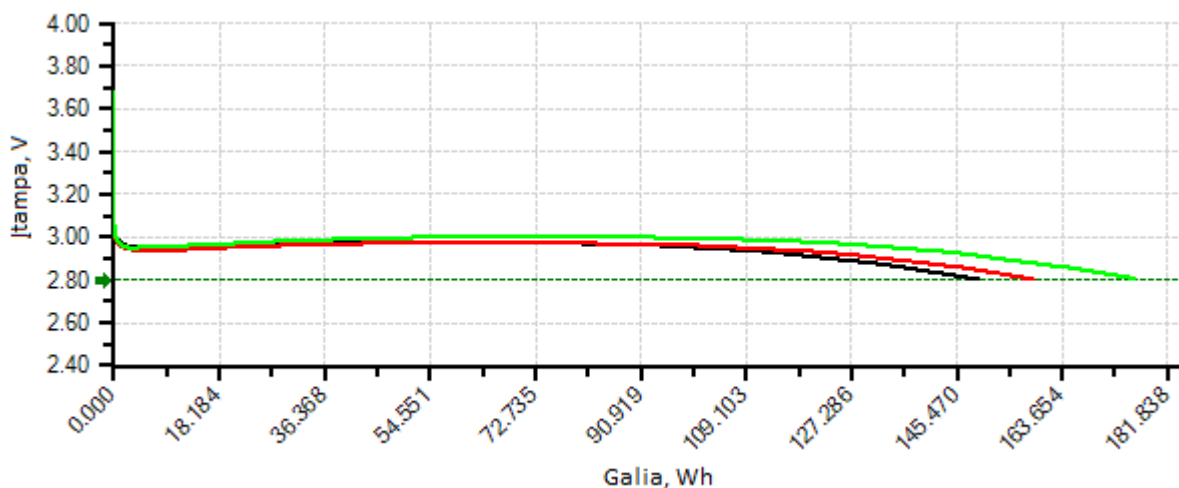
Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie žemos (-20±2) °C temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, vidutinis CALB baterijos talpumas yra **68,829** Ah, vidutinė galia yra **195,156** Wh ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,5 V įtampos ribos yra **205** minutės.

4.1.2.3. Sinopoly baterijos tyrimai prie (-20±2) °C

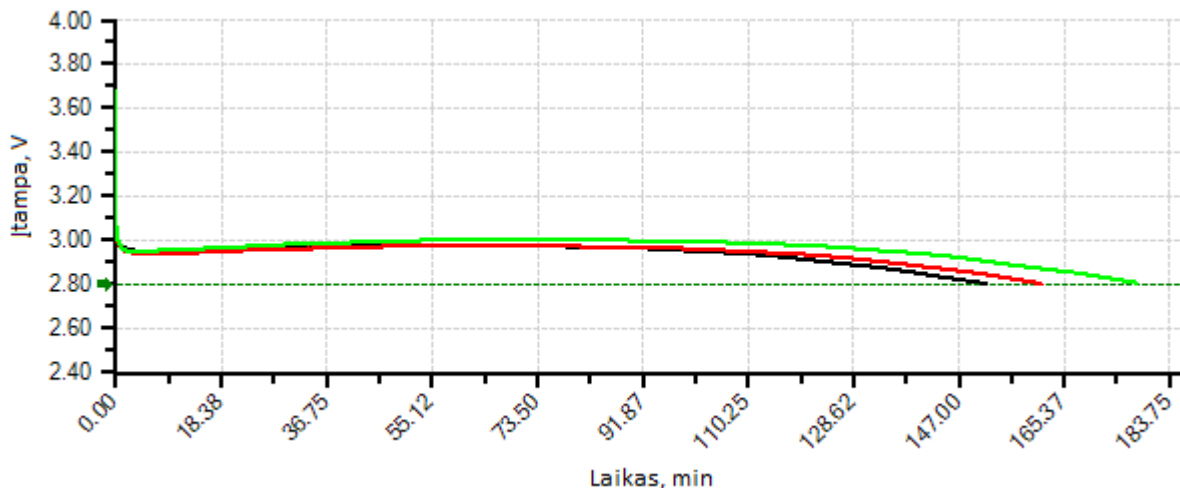
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23±2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,8 V įtampos ribos. Po pakrovimo baterija pastatyta į šaldiklį ir praėjus nemažiau kaip 20 val. prie žemos (-20±2) °C temperatūros, baterija iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,8 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 46-48 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 19 lentelėje.



46 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos talpumas prie (-20±2)°C



47 pav. Nustatyta Sinopoly baterijos galia prie (-20±2)°C



48 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos iškrovimo laikas prie $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$

19 lentelė. Sinopoly baterijos iškrovimo proceso prie $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,51	50,951	149,669	152	3,29
2	raudona	3,53	54,073	158,797	161	3,29
3	žalia	3,68	59,741	176,712	178	3,29
Vidurkis:		3,57	54,921	160,726	163	3,29

Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie žemos $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, vidutinis Sinopoly baterijos talpumas yra **54,921 Ah**, vidutinė galia yra **160,726 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,8 V įtampos ribos yra **163** minutės.

4.1.2.4. Eksperimentinių tyrimų prie $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ rezultatų vidurkių palyginamoji analizė ir apibendrinimas

Analizuojant visų trijų baterijų tyrimo metų gautus rezultatus yra išvedami kiekvienos baterijos rezultatų vidurkiai. Analizės metu yra palygintos tokios baterijų charakteristikos kaip vidutinis nominalus talpumas, vidutinė nominali galia ir vidutinis iškrovimo laikas. Atliktų bandymų rezultatų vidurkių palyginimas yra pateiktas 20 lentelėje.

20 lentelė. Baterijų testavimo prie (-20±2) °C rezultatų vidurkių apibendrinimas

Baterija	Vidurkiai				
	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
Winston	3,49	83,602	238,651	249	3,28
CALB	3,35	68,829	195,156	205	3,28
Sinopoly	3,57	54,921	160,726	163	3,29

Lyginant trijų gamintojų baterijų eksperimentinių tyrimų metų gautų rezultatų vidurkius, galima teigti, kad prie žemos (-20±2)°C temperatūros geriausi rezultatai gauti su Winston baterija, kuriai buvo nustatytas **83,602** Ah vidutinis talpumas, **238,651** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **249** minutes. Vidutinis rezultatas gautas su CALB baterija, kuriai buvo nustatytas **68,829** Ah vidutinis talpumas, **195,156** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **205** minutes. Prasčiausias rezultatas gautas su Sinopoly baterija, kuriai buvo nustatytas **54,921** Ah vidutinis talpumas, **160,726** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **163** minutes.

4.1.3. Eksperimentinių tyrimų prie skirtingų temperatūrų rezultatų analizė ir palyginimas

Lyginant trijų gamintojų baterijų eksperimentinių tyrimų metų gautų rezultatų vidurkius prie normalios ir žemos temperatūros yra apskaičiuota kokią įtaką baterijų darbui turėjo žema temperatūra. Rezultatų palyginimas yra pateiktas 21 lentelėje.

21 lentelė. Baterijų vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C

Baterija	Nustatytas vidutinis talpumas, Ah		Vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C
	prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Winston	109,014	83,602	23%
CALB	107,642	68,829	36%
Sinopoly	110,122	54,921	50%

22 lentelė. Baterijų vidutinės galios sumažėjimas prie (-20±2) °C

Baterija	Nustatyta vidutinė galia, Wh		Vidutinės galios sumažėjimas prie (-20±2) °C
	prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Winston	345,889	238,651	31%
CALB	340,616	195,156	43%
Sinopoly	350,177	160,726	54%

23 lentelė. Baterijų vidutinio iškrovimo laiko sumažėjimas prie (-20±2) °C

Baterija	Nustatytas vidutinis iškrovimo laikas, min.		Vidutinio iškrovimo laiko sumažėjimas prie (-20±2) °C
	prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Winston	326	249	23%
CALB	321	205	36%
Sinopoly	329	163	50%

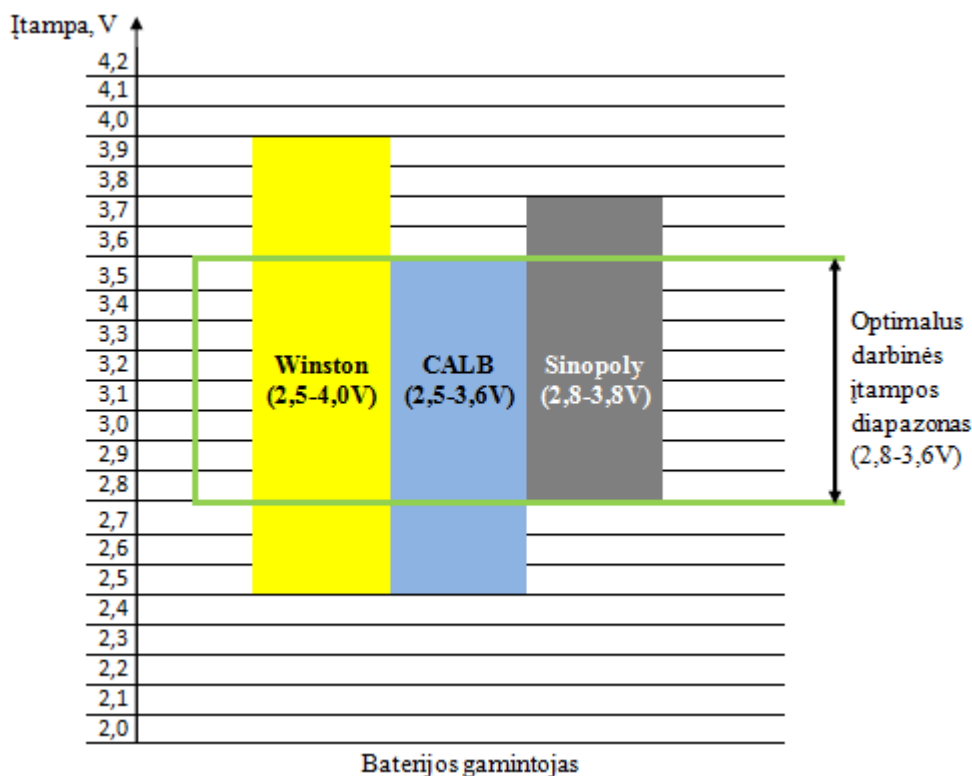
Gauti rezultatai parodė, kad žema temperatūra stipriai paveikia baterijų darbą. Didžiausią įtaką žema temperatūrą padarė Sinopoly baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **50%**, galia sumažėjo **54%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **50%**. Vidutinę įtaką žema temperatūrą padarė CALB baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **36%**, galia sumažėjo **43%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **36%**. Mažiausią įtaką žema temperatūrą padarė Winston baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **23%**, galia sumažėjo **31%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **23%**.

Gauti rezultatai leidžia daryti išvadą, kad Winston gamintojo baterijos yra tinkamiausios naudojimui elektra varomame transporte įvairiomis temperatūros sąlygomis.

4.2. Papildomai atlikti tyrimai

Labai daug yra diskutuojama apie tai, ar verta paisyti ličio geležies fosfato baterijų gamintojų nurodomas pakrovimo ir iškrovimo įtampos ribas, ypač kai darbinės įtampos diapazonas yra pernelyg platus. Yra nuomonė, kad optimalus ličio geležies fosfato baterijų darbinės įtampos

diapazonas turi būti nuo 2,8 V iki 3,6 V. Tokį darbinės įtampos diapazoną galima pritaikyti ir tiriamos baterijoms (49 pav.)



49 pav. Skirtingų gamintojų baterijų darbinės įtampos diapazonai

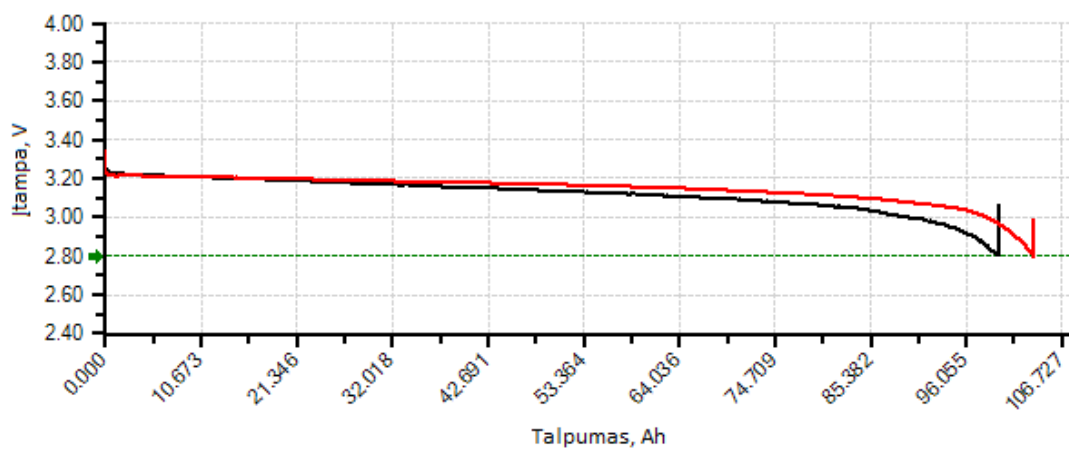
Siekiant išsiaiškinti kaip optimalaus darbinės įtampos diapazono taikymas paveiks baterijų iškrovimo charakteristikas yra atlikti eksperimentiniai tyrimai, kurių metu baterijos yra pakraunamos prie normalios temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos ir praėjus nemažiau 1 val. po pakrovimo iškraunamos 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,8 V įtampos ribos.

4.2.1. Eksperimentiniai baterijų iškrovimo tyrimai prie $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną

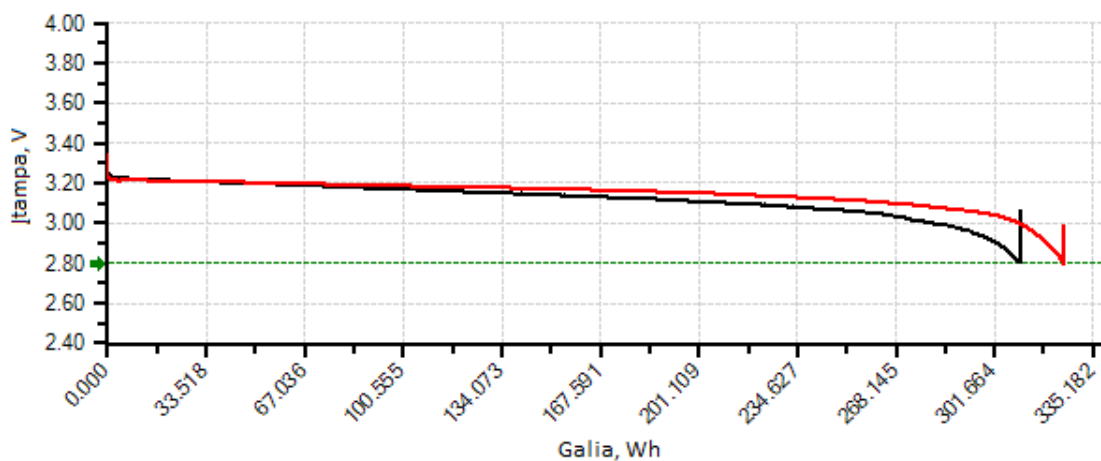
4.2.1.1. Winston baterijos tyrimai prie $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$

Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos ir praėjus nemažiau 1 val. po pakrovimo yra iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,8 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti

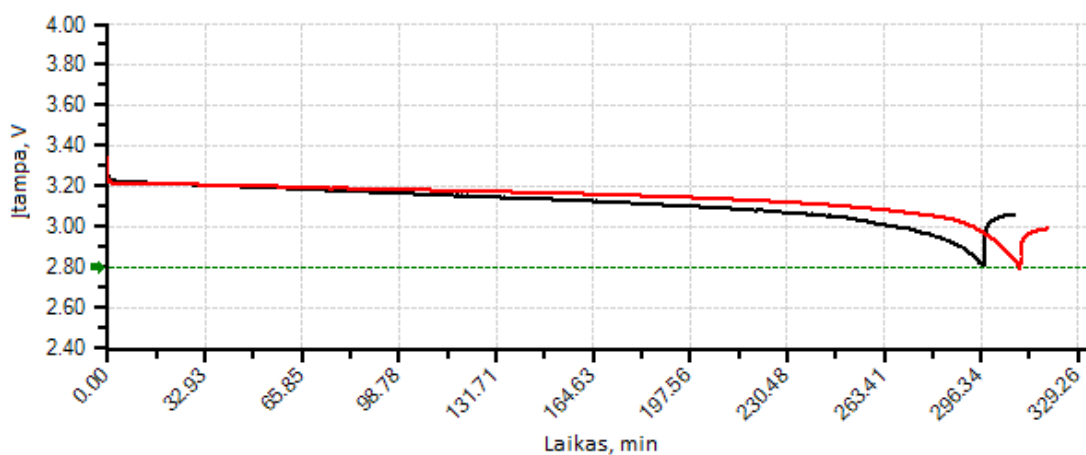
rezultatai yra pateikti 50-52 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 24 lentelėje.



50 pav. Nustatytas Winston baterijos talpumas prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$



51 pav. Nustatyta Winston baterijos galia prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$



52 pav. Nustatytas Winston baterijos iškrovimo laikas prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$

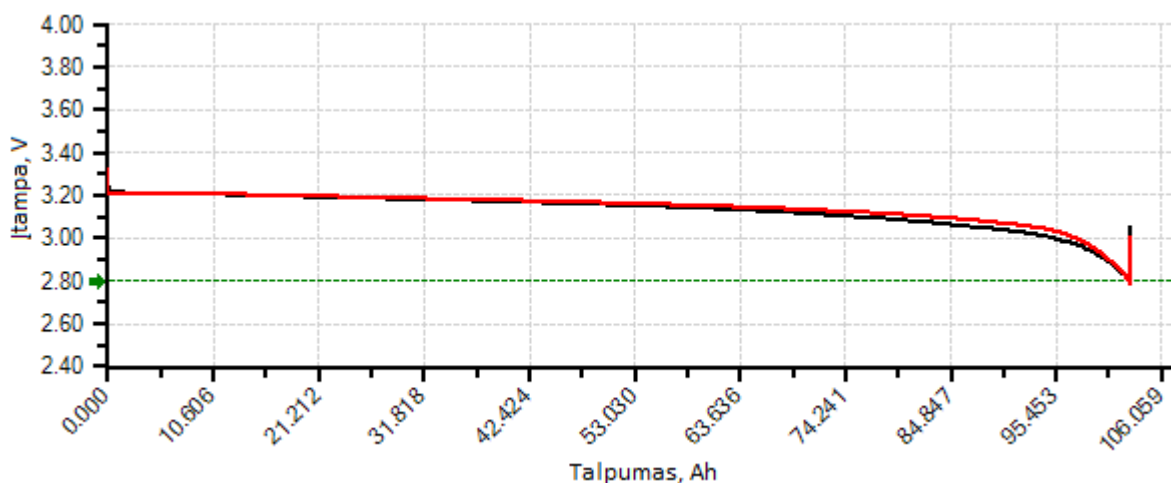
24 lentelė. Winston baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,35	99,702	310,591	278	3,14
2	raudona	3,35	103,721	325,735	310	3,07
Vidurkis:		3,35	101,711	318,163	294	3,11

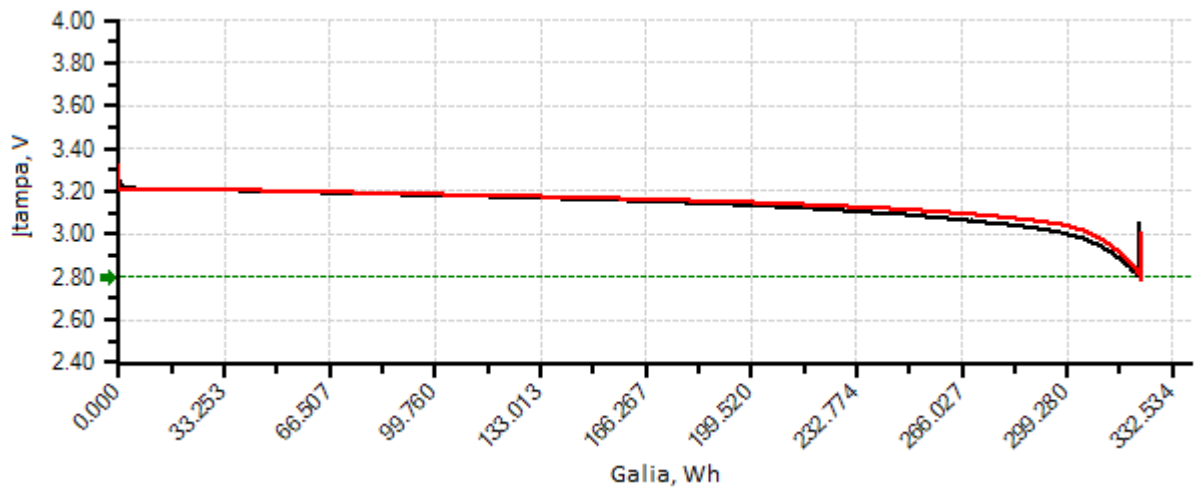
Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie normalios (23±2) °C temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną, vidutinis Winston baterijos talpumas yra **101,711 Ah**, vidutinė galia yra **318,163 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,8 V įtampos ribos yra **294** minutės.

4.2.1.2. CALB baterijos tyrimai prie (23±2) °C

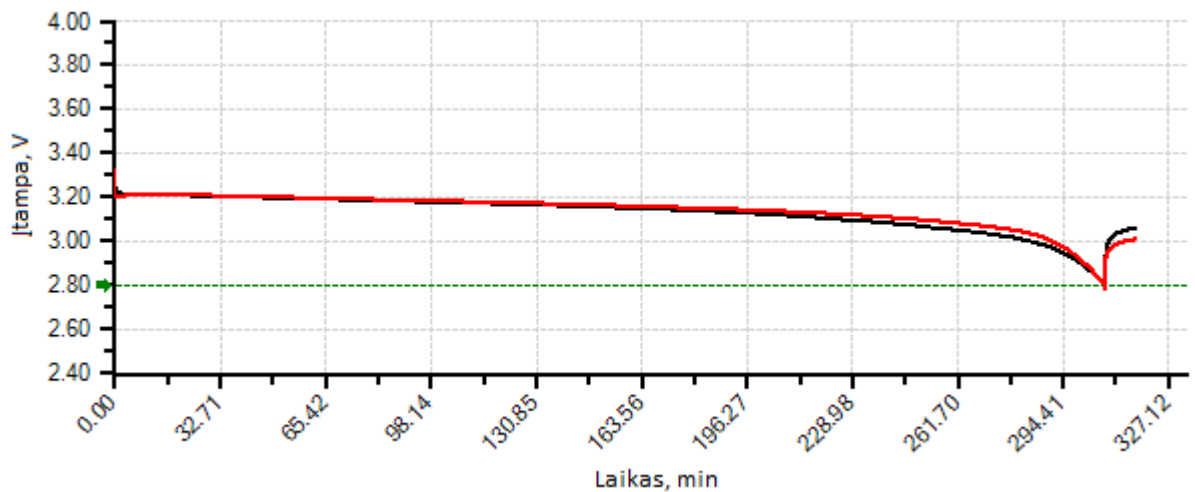
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23±2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos ir praėjus nemažiau 1 val. po pakrovimo yra iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,8 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 53-55 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 25 lentelėje.



53 pav. Nustatytas CALB baterijos talpumas prie (23±2) °C



54 pav. Nustatyta CALB baterijos galia prie (23±2) °C



55 pav. Nustatytas CALB baterijos iškrovimo laikas prie (23±2) °C

25 lentelė. CALB baterijos iškrovimo proceso prie (23±2) °C rezultatų apibendrinimas

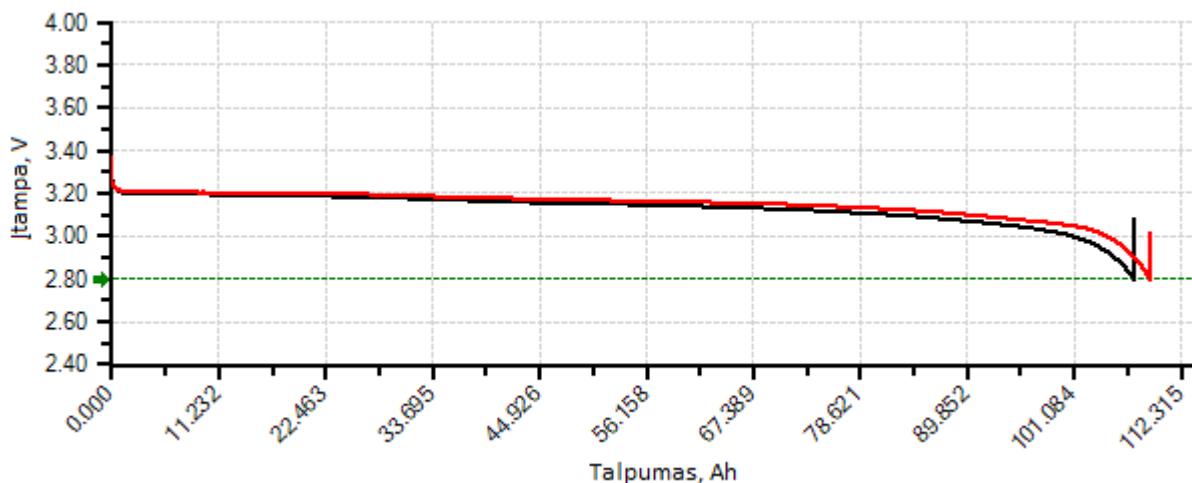
Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,36	103,071	322,266	307	3,14
2	raudona	3,34	102,943	323,161	307	3,10
Vidurkis:		3,35	103,007	322,713	307	3,12

Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie normalios (23±2) °C temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną,

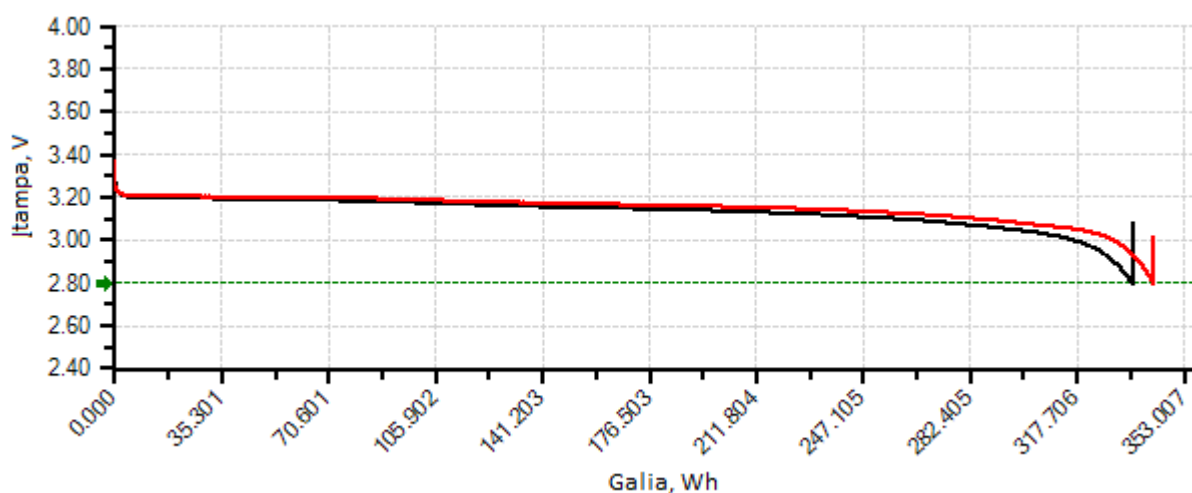
vidutinis CALB baterijos talpumas yra **103,007** Ah, vidutinė galia yra **322,713** Wh ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,8 V įtampos ribos yra **307** minutės.

4.2.1.3. Sinopoly baterijos tyrimai prie (23 ± 2) °C

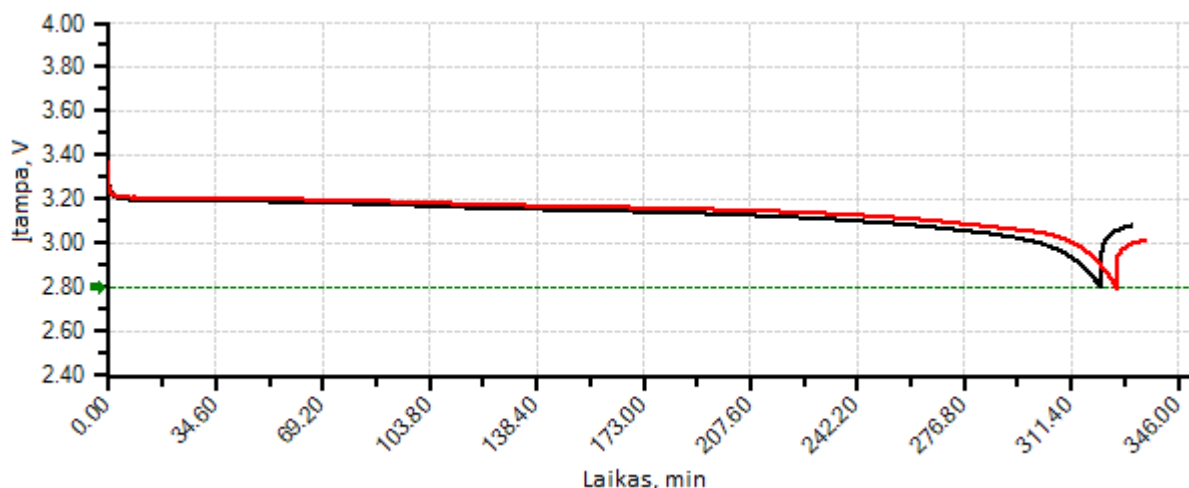
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23 ± 2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos ir praėjus nemažiau 1 val. po pakrovimo yra iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,8 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 56-58 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 26 lentelėje.



56 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos talpumas prie (23 ± 2) °C



57 pav. Nustatyta Sinopoly baterijos galia prie (23 ± 2) °C



58 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos iškrovimo laikas prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$

26 lentelė. Sinopoly baterijos iškrovimo proceso prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,41	107,542	336,096	321	3,17
2	raudona	3,38	109,151	343,057	326	3,11
Vidurkis:		3,39	108,346	339,576	324	3,14

Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie normalios $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną, vidutinis CALB baterijos talpumas yra **108,346 Ah**, vidutinė galia yra **339,576 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,8 V įtampos ribos yra **324** minutės.

4.2.1.4. Eksperimentinių tyrimų prie $(23\pm 2)^\circ\text{C}$, naudojant optimalų rezultatų darbinės įtampos diapazoną, rezultatų vidurkių palyginamoji analizė ir apibendrinimas

Analizuojant visų trijų baterijų tyrimo metų gautus rezultatus yra išvedami kiekvienos baterijos rezultatų vidurkiai. Analizės metu yra palygintos tokios baterijų charakteristikos kaip vidutinis nominalus talpumas, vidutinė nominali galia ir vidutinis iškrovimo laikas. Atliktų bandymų rezultatų vidurkių palyginimas yra pateiktas 27 lentelėje.

27 lentelė. Baterijų iškrovimo proceso prie (23 ± 2) °C rezultatų vidurkių apibendrinimas

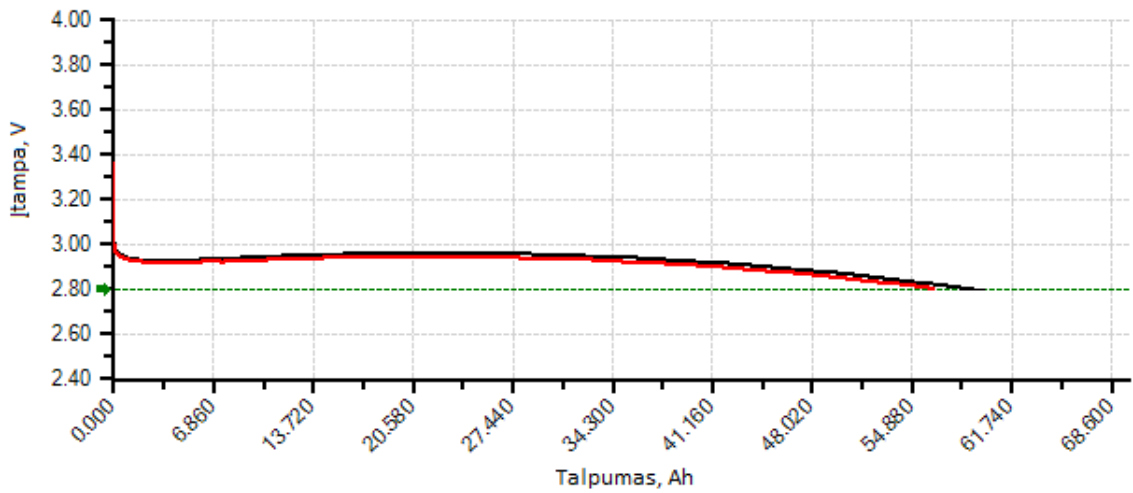
Baterija	Vidurkiai				
	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
Winston	3,35	101,711	318,163	294	3,11
CALB	3,35	103,007	322,713	307	3,12
Sinopoly	3,39	108,346	339,576	324	3,14

Lyginant trijų gamintojų baterijų eksperimentinių tyrimų metų, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną (2,8-3,6)V, gautų rezultatų vidurkius, galima teigti, kad: prie normalios (23 ± 2) °C temperatūros geriausi rezultatai gauti su Sinopoly baterija, kuriai buvo nustatytas **108,346** Ah vidutinis talpumas, **339,576** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **324** minutes. Vidutiniai rezultatai gauti su CALB baterija, kuriai buvo nustatytas **103,007** Ah vidutinis talpumas, **322,713** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **307** minutes. Prasčiausi rezultatai gauti su Winston baterija, kuriai buvo nustatytas **101,711** Ah vidutinis talpumas, **318,163** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **294** minutes.

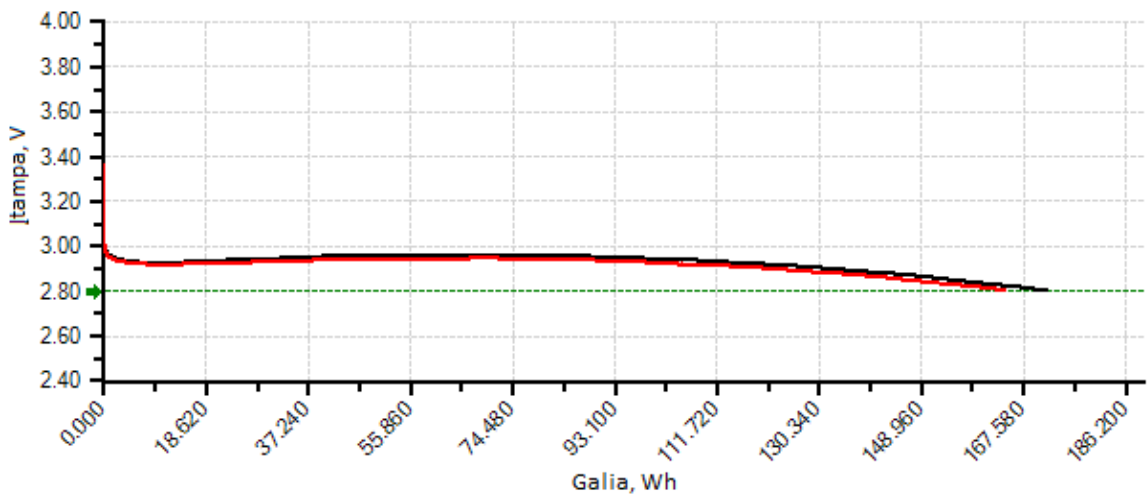
4.2.2. Eksperimentiniai baterijų iškrovimo tyrimai prie (-20 ± 2) °C naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną

4.2.2.1. Winston baterijos tyrimai prie (-20 ± 2) °C

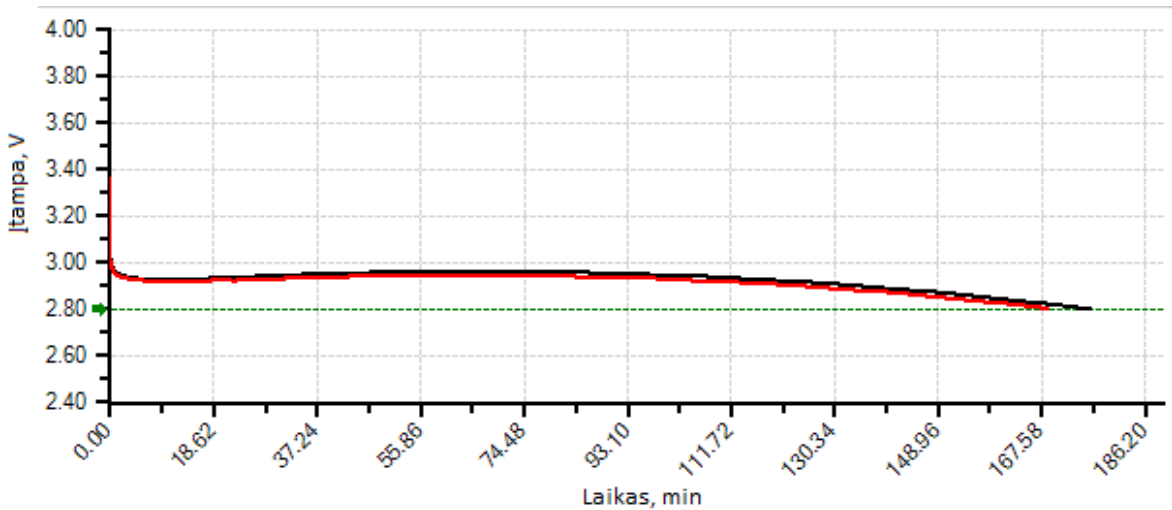
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23 ± 2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos. Po pakrovimo baterija pastatyta į šaldiklį ir praėjus nemažiau kaip 20 val. prie žemos (-20 ± 2) °C temperatūros, baterija iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,8 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 59-61 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 28 lentelėje.



59 pav. Nustatytas Winston baterijos talpumas prie (-20±2)°C



60 pav. Nustatyta Winston baterijos galia prie (-20±2)°C



61 pav. Nustatytas Winston baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C

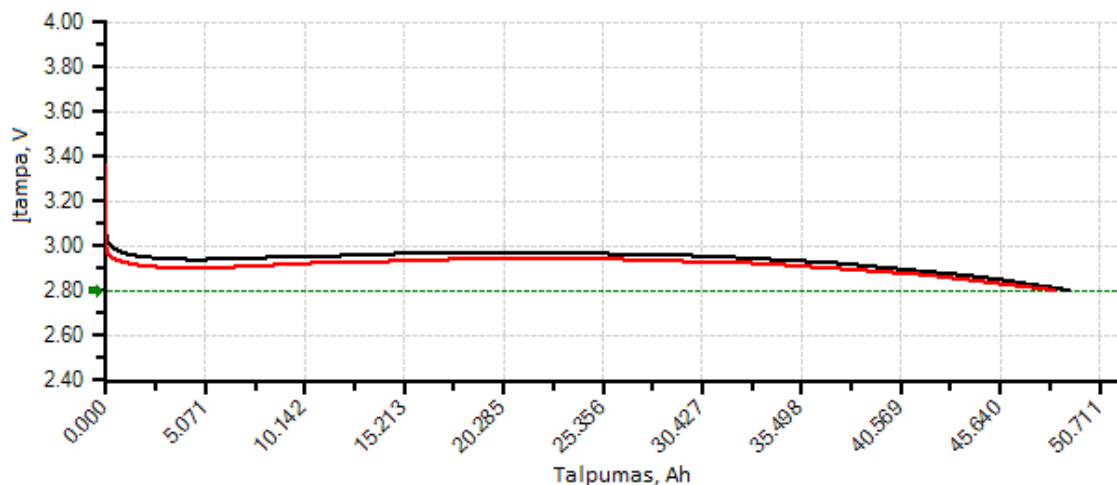
28 lentelė. Winston baterijos iškrovimo proceso prie $(-20\pm 2)^\circ\text{C}$ rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,37	58,801	171,516	175	3,23
2	raudona	3,39	56,555	164,563	169	3,29
Vidurkis:		3,38	57,678	168,039	172	3,26

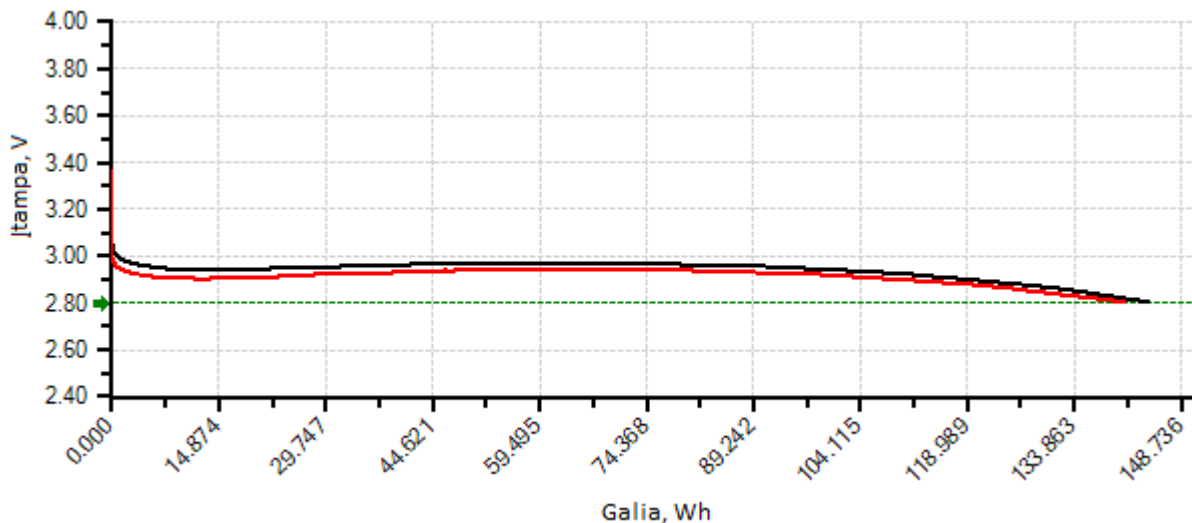
Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie žemos $(-20\pm 2)^\circ\text{C}$ temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną, vidutinis Winston baterijos talpumas yra **57,678 Ah**, vidutinė galia yra **168,039 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,8 V įtampos ribos yra **172** minutės.

4.2.2.2. CALB baterijos tyrimai prie $(-20\pm 2)^\circ\text{C}$

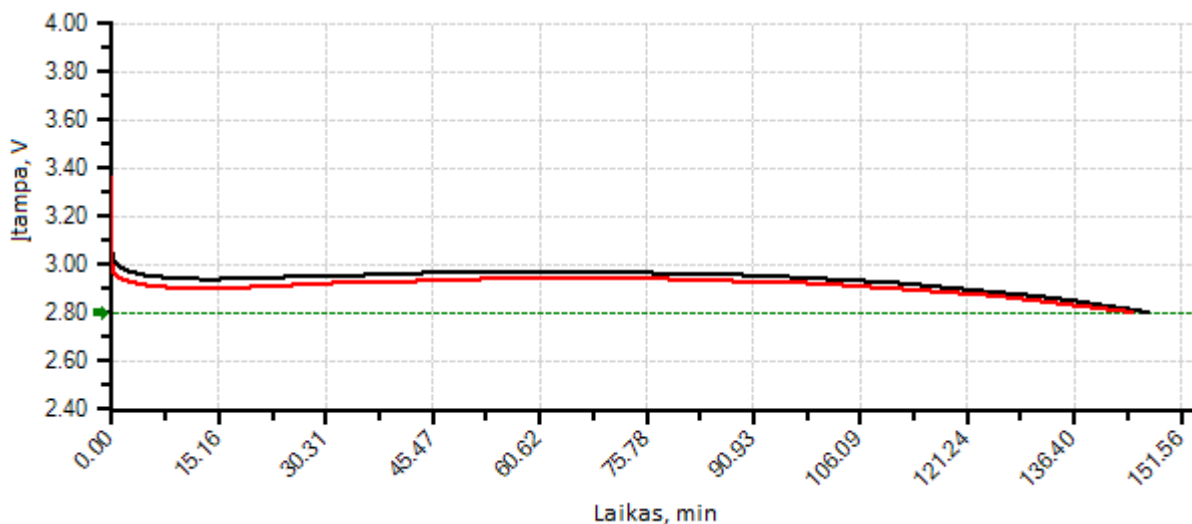
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos. Po pakrovimo baterija pastatyta į šaldiklį ir praėjus nemažiau kaip 20 val. prie žemos $(-20\pm 2)^\circ\text{C}$ temperatūros, baterija iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,8 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 62-64 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 29 lentelėje.



62 pav. Nustatytas CALB baterijos talpumas prie $(-20\pm 2)^\circ\text{C}$



63 pav. Nustatyta CALB baterijos galia prie (-20±2)°C



64 pav. Nustatytas CALB baterijos iškrovimo laikas prie (-20±2)°C

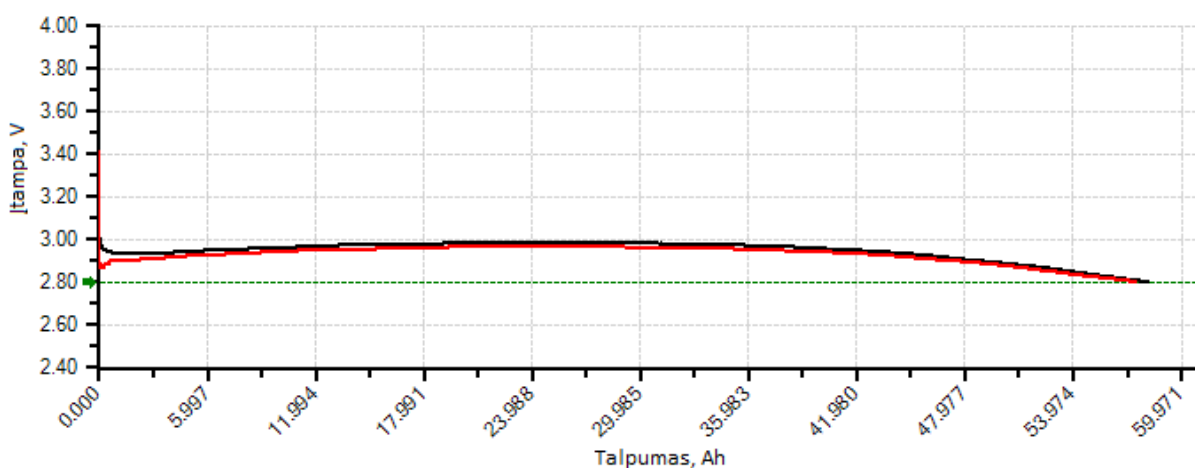
29 lentelė. CALB baterijos iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,39	49,282	144,544	147	3,29
2	raudona	3,37	48,511	141,094	145	3,29
Vidurkis:		3,38	48,896	142,819	146	3,29

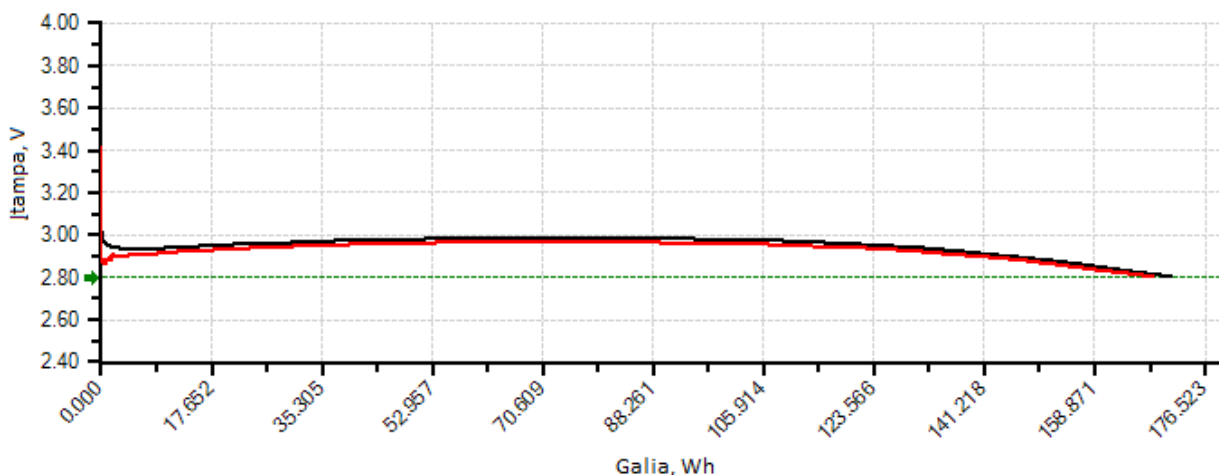
Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie žemos (-20 ± 2) °C temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną, vidutinis CALB baterijos talpumas yra **48,896 Ah**, vidutinė galia yra **142,819 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,8 V įtampos ribos yra **146** minutės.

4.2.2.3. Sinopoly baterijos tyrimai prie (-20 ± 2) °C

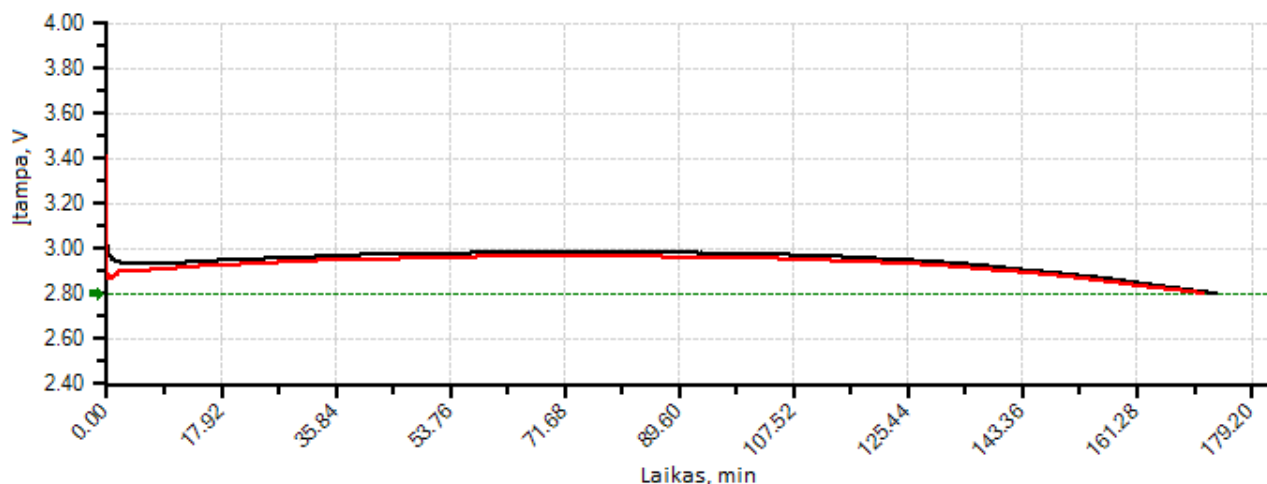
Tyrimo aprašymas: baterija pakrauta prie normalios (23 ± 2) °C temperatūros 30 A stiprumo nuolatine srove iki 3,6 V įtampos ribos. Po pakrovimo baterija pastatyta į šaldiklį ir praėjus nemažiau kaip 20 val. prie žemos (-20 ± 2) °C temperatūros, baterija iškrauta 20 A stiprumo nuolatine srove iki 2,8 V įtampos ribos. Eksperimentinio tyrimo metu yra nustatytos tokios baterijos charakteristikos kaip nominalus talpumas, nominali galia ir iškrovimo laikas. Gauti rezultatai yra pateikti 65-67 pav. Atliktų bandymų rezultatų apibendrinimas yra pateiktas 30 lentelėje.



65 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos talpumas prie (-20 ± 2) °C



66 pav. Nustatyta Sinopoly baterijos galia prie (-20 ± 2) °C



67 pav. Nustatytas Sinopoly baterijos iškrovimo laikas prie $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$

30 lentelė. Sinopoly baterijos iškrovimo proceso prie $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ rezultatų apibendrinimas

Bandymas	Kreivės spalva	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
1	juoda	3,43	58,283	171,547	174	3,29
2	raudona	3,43	57,559	168,529	172	3,29
Vidurkis:		3,43	57,921	170,038	173	3,29

Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad prie žemos $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ temperatūros ir 20 A stiprumo nuolatinės iškrovimo srovės, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną, vidutinis Sinopoly baterijos talpumas yra **57,921 Ah**, vidutinė galia yra **170,038 Wh** ir vidutinis iškrovimo laikas iki 2,8 V įtampos ribos yra **173** minutės.

4.2.2.4. Eksperimentinių tyrimų prie $(-20\pm 2)^{\circ}\text{C}$, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną, rezultatų vidurkių palyginamoji analizė ir apibendrinimas

Analizuojant visų trijų baterijų tyrimo metų gautus rezultatus yra išvedami kiekvienos baterijos rezultatų vidurkiaiai. Analizės metu yra palygintos tokios baterijų charakteristikos kaip vidutinis nominalus talpumas, vidutinė nominali galia ir vidutinis iškrovimo laikas. Atliktų bandymų rezultatų vidurkių palyginimas yra pateiktas 31 lentelėje.

31 lentelė. Baterijų iškrovimo proceso prie (-20±2) °C rezultatų vidurkių apibendrinimas

Baterija	Vidurkiai				
	Įtampa po pakrovimo, V	Nustatytas talpumas, Ah	Nustatyta galia, Wh	Iškrovimo laikas, min.	Įtampa po iškrovimo, V
Winston	3,38	57,678	168,039	172	3,26
CALB	3,38	48,896	142,819	146	3,29
Sinopoly	3,43	57,921	170,038	173	3,29

Lyginant trijų gamintojų baterijų eksperimentinių tyrimų metų gautų rezultatų vidurkius, galima teigti, kad prie žemos (-20±2)°C temperatūros geriausi rezultatai gauti su Sinopoly baterija, kuriai buvo nustatytas **57,921** Ah vidutinis talpumas, **170,038** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **173** minutes. Vidutiniai rezultatai gauti su Winston baterija, kuriai buvo nustatytas **57,678** Ah vidutinis talpumas, **168,039** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **172** minutes. Prasčiausi rezultatai gauti su CALB baterija, kuriai buvo nustatytas **48,896** Ah vidutinis talpumas, **142,819** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **146** minutes.

4.2.3. Eksperimentinių tyrimų prie skirtingų temperatūrų, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną, rezultatų vidurkių analizė ir apibendrinimas

Lyginant trijų gamintojų baterijų eksperimentinių tyrimų metų gautų rezultatų vidurkius prie normalios ir žemos temperatūros yra apskaičiuota kokią įtaką baterijų darbui turėjo žema temperatūra ir optimalus darbinės įtampos diapazono panaudojimas. Rezultatų palyginimas yra pateiktas 32 lentelėje.

32 lentelė. Baterijų vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C

Baterija	Nustatytas vidutinis talpumas, Ah		Vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C
	prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Winston	101,711	57,678	43%
CALB	103,007	48,896	52%
Sinopoly	108,346	57,921	46%

33 lentelė. Baterijų vidutinės galios sumažėjimas prie (-20±2) °C

Baterija	Nustatyta vidutinė galia, Wh		Vidutinės galios sumažėjimas prie (-20±2) °C
	prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Winston	318,163	168,039	47%
CALB	322,713	142,819	55%
Sinopoly	339,576	170,038	50%

34 lentelė. Baterijų vidutinio iškrovimo laiko sumažėjimas prie (-20±2) °C

Baterija	Nustatytas vidutinis iškrovimo laikas, min.		Vidutinio iškrovimo laiko sumažėjimas prie (-20±2) °C
	prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Winston	294	172	41%
CALB	307	146	52%
Sinopoly	324	173	46%

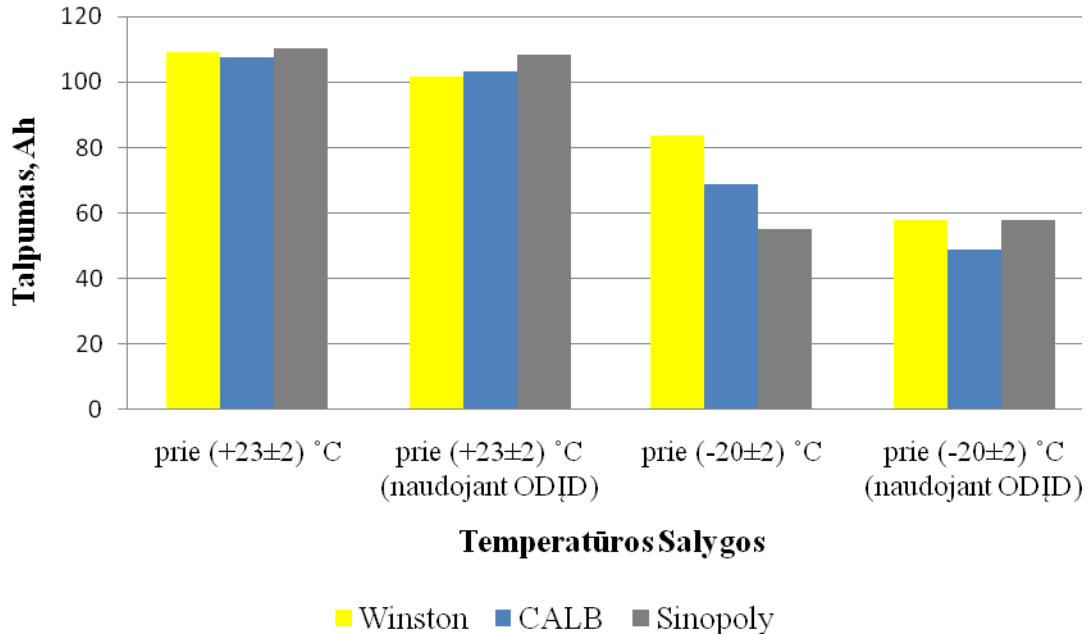
Gauti rezultatai parodė, kad optimalaus darbinės įtampos diapazono panaudojimas paveikia baterijų darbą. Didžiausią įtaką optimalus darbinės įtampos diapazonas padarė CALB baterijos darbui, jos talpumas prie žemos temperatūros sumažėjo **52%**, galia sumažėjo **55%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **52%**. Vidutinę įtaką žema temperatūrą padarė Sinopoly baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **46%**, galia sumažėjo **50%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **46%**. Mažiausią įtaką žema temperatūrą padarė Winston baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **43%**, galia sumažėjo **47%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **41%**. Gauti rezultatai leidžia daryti išvadą, kad Sinopoly gamintojo baterijos yra tinkamiausios naudojimui elektra varomame transporte įvairiomis temperatūros sąlygomis naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną.

4.2.4. Visų gautų rezultatų vidurkių analizė ir palyginimas

Nustatyto baterijų talpumo vidurkių palyginimas yra pateiktas 35 lentelėje ir 68 pav.

35 lentelė. Nustatyto baterijų talpumo vidurkių palyginimas

Darbinės įtampos diapazonas	Baterija	Nustatytas vidutinis talpumas, Ah		Vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C
		prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Nurodytas gamintojų	Winston	109,014	83,602	23%
	CALB	107,642	68,829	36%
	Sinopoly	110,122	54,921	50%
Optimalus	Winston	101,711	57,678	43%
	CALB	103,007	48,896	52%
	Sinopoly	108,346	57,921	46%

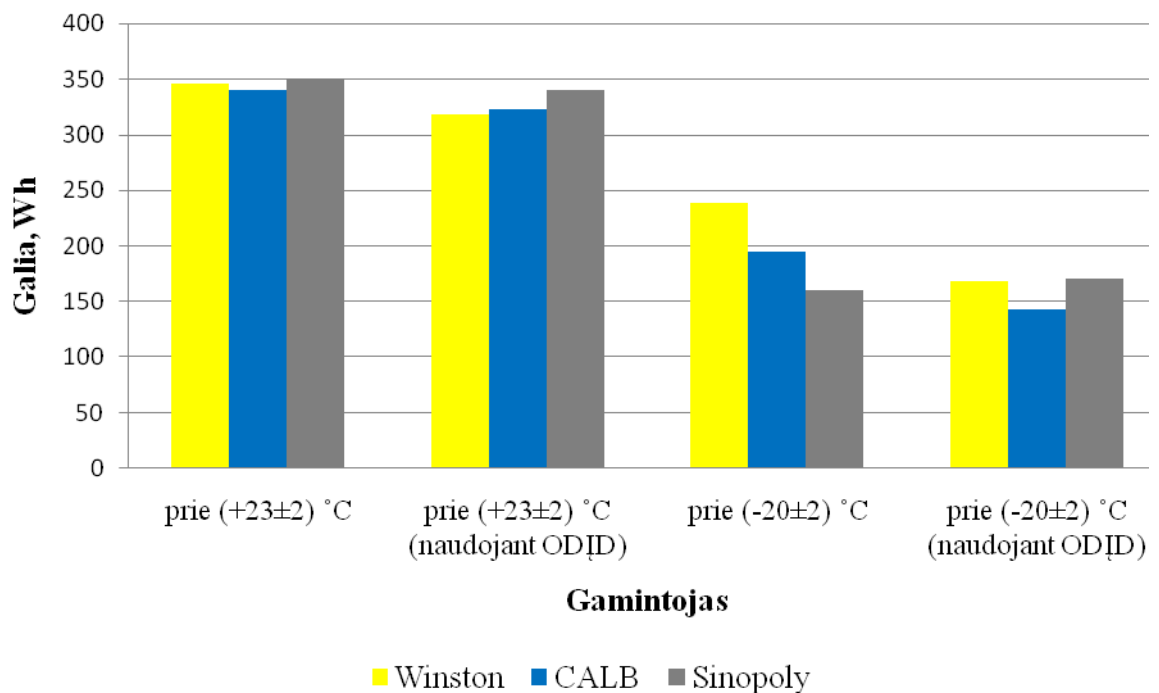


68 pav. Nustatyto baterijų talpumo vidurkių palyginimas

Nustatytos baterijų galios vidurkių palyginimas yra pateiktas 36 lentelėje ir 69 pav.

36 lentelė. Nustatytos baterijų galios vidurkių palyginimas

Darbinės įtampos diapazonas	Baterija	Nustatyta vidutinė galia, Wh		Vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C
		prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Nurodytas gamintojų	Winston	345,889	238,651	31%
	CALB	340,616	195,156	43%
	Sinopoly	350,177	160,726	54%
Optimalus	Winston	318,163	168,039	47%
	CALB	322,713	142,819	55%
	Sinopoly	339,576	170,038	50%

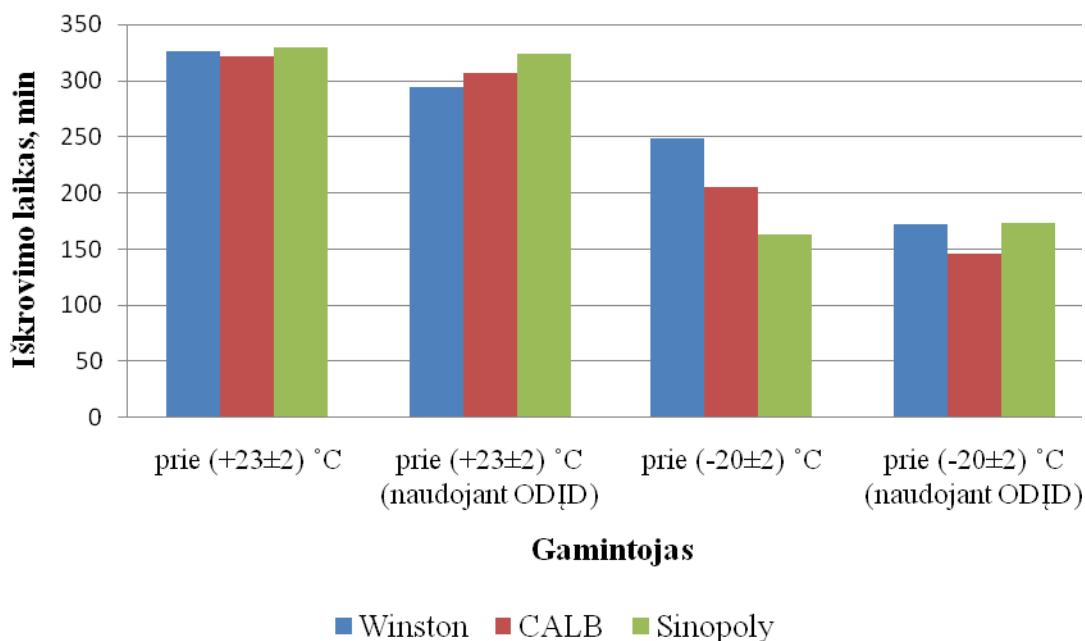


69 pav. Nustatytos baterijų galios vidurkių palyginimas

Nustatyto baterijų iškrovimo laiko vidurkių palyginimas yra pateiktas 37 lentelėje ir 70 pav.

37 lentelė. Nustatyto baterijų iškrovimo laiko vidurkių palyginimas

Darbinės įtampos diapazonas	Baterija	Nustatytas vidutinis iškrovimo laikas, min.		Vidutinio talpumo sumažėjimas prie (-20±2) °C
		prie (+23±2) °C	prie (-20±2) °C	
Nurodytas gamintojų	Winston	326	249	23%
	CALB	321	205	36%
	Sinopoly	329	163	50%
Optimalus	Winston	294	172	41%
	CALB	307	146	52%
	Sinopoly	324	173	46%



70 pav. Nustatyto baterijų iškrovimo laiko vidurkių palyginimas

Apibendrinant visus rezultatus galima teigti, kad naudojimui normalios temperatūros sąlygomis geriausia yra naudoti Sinopoly baterijas, tačiau naudojimui žemos temperatūros sąlygomis geriausia yra naudoti Winston baterijas. Papildomai atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną (2,8-3,6)V, eksperimentinių tyrimų rezultatai yra prastesni už rezultatus gautus naudojant gamintojų nurodomus darbinės įtampos diapazonus.

IŠVADOS

Atlikti ličio geležies fosfato baterijų iškrovimo prie skirtingų temperatūrų proceso tyrimai, kuriais buvo siekiama nustatyti tinkamiausias baterijas panaudojimui elektra varomame transporte Lietuvos sąlygomis. Papildomai buvo atlikti ličio geležies fosfato baterijų iškrovimo, naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną prie skirtingų temperatūrų, proceso tyrimai.

1. Atlikus įvairių rinkoje siūlomų baterijų rūšių analizę, tyrimams buvo pasirinktos ličio geležies fosfato baterijos kaip pačios tinkamiausios panaudojimui elektra varomame transporte dėl to, kad yra nekenksmingos aplinkai, pasižymi aukštu stabilumu prie žemos ir aukštos temperatūros ir turi ilgą tarnavimo laiką.

2. Atlikta mokslinių straipsnių analizė parodė, kad ličio geležies fosfato baterijų iškrovimo ir pakrovimo charakteristikos priklauso nuo sąlygų prie kurių buvo pagaminti jų elektrodai.

3. Parengta tyrimo metodika, parinktos tyrimo priemonės, suprojektuotas tyrimo stendas, ir atlikti trijų skirtingų gamintojų (Winston, CALB, Sinopoly) 100Ah talpos LiFePO₄ baterijų iškrovimo proceso prie skirtingų temperatūrų tyrimai.

4. Atlikta trijų skirtingų gamintojų baterijų eksperimentinių tyrimų metų gautų rezultatų vidurkių analizė ir nustatyta, kad :

- prie normalios (23±2)°C temperatūros geriausi rezultatai gauti su Sinopoly baterija, kuriai buvo nustatytas **110,122** Ah vidutinis talpumas, **350,177** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **329** minutes. Vidutinis rezultatas gautas su Winston baterija, kuriai buvo nustatytas **109,014** Ah vidutinis talpumas, **345,889** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **326** minutes. Prasčiausias rezultatas gautas su CALB baterija, kuriai buvo nustatytas **107,642** Ah vidutinis talpumas, **340,616** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **321** minutes;

- prie žemos (-20±2)°C temperatūros geriausi rezultatai gauti su Winston baterija, kuriai buvo nustatytas **83,602** Ah vidutinis talpumas, **238,651** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **249** minutes. Vidutinis rezultatas gautas su CALB baterija, kuriai buvo nustatytas **68,829** Ah vidutinis talpumas, **195,156** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **205** minutes. Prasčiausias rezultatas gautas su Sinopoly baterija, kuriai buvo nustatytas **54,921** Ah vidutinis talpumas, **160,726** Wh vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki iškrovimo įtampos ribos sudarė **163** minutes.

Gauti rezultatai parodė, kad žema temperatūra stipriai paveikia baterijų darbą. Didžiausią įtaką žema temperatūrą padarė Sinopoly baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **50%**, galia sumažėjo **54%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **50%**. Vidutinę įtaką žema temperatūrą padarė CALB baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **36%**, galia sumažėjo **43%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **36%**. Mažiausią įtaką žema temperatūrą padarė Winston baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **23%**, galia sumažėjo **31%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **23%**.

Gauti rezultatai leidžia daryti išvadą, kad Winston gamintojo baterijos yra tinkamiausios naudojimui elektra varomame transporte įvairiomis temperatūros sąlygomis.

5. Atlikta trijų skirtingų gamintojų baterijų eksperimentinių tyrimų metų, naudojant optimalios darbinės įtampos diapazoną (2,8-3,6)V, gautų rezultatų vidurkių analizė ir nustatyta, kad:

- prie normalios (23 ± 2)°C temperatūros geriausi rezultatai gauti su Sinopoly baterija, kuriai buvo nustatytas **108,346 Ah** vidutinis talpumas, **339,576 Wh** vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **324** minutes. Vidutiniai rezultatai gauti su CALB baterija, kuriai buvo nustatytas **103,007 Ah** vidutinis talpumas, **322,713 Wh** vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **307** minutes. Prasčiausi rezultatai gauti su Winston baterija, kuriai buvo nustatytas **101,711 Ah** vidutinis talpumas, **318,163 Wh** vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **294** minutes.

- prie žemos (-20 ± 2)°C temperatūros geriausi rezultatai gauti su Sinopoly baterija, kuriai buvo nustatytas **57,921 Ah** vidutinis talpumas, **170,038 Wh** vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **173** minutes. Vidutiniai rezultatai gauti su Winston baterija, kuriai buvo nustatytas **57,678 Ah** vidutinis talpumas, **168,039 Wh** vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **172** minutes. Prasčiausi rezultatai gauti su CALB baterija, kuriai buvo nustatytas **48,896 Ah** vidutinis talpumas, **142,819 Wh** vidutinė galia ir kurios vidutinis iškrovimo laikas iki optimalios iškrovimo įtampos ribos sudarė **146** minutes.

Gauti rezultatai parodė, kad optimalaus darbinės įtampos diapazono panaudojimas paveikia baterijų darbą. Didžiausią įtaką optimalus darbinės įtampos diapazonas padarė CALB baterijos darbui, jos talpumas prie žemos temperatūros sumažėjo **52%**, galia sumažėjo **55%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **52%**. Vidutinę įtaką žema temperatūrą padarė Sinopoly baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **46%**, galia sumažėjo **50%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **46%**. Mažiausią įtaką

žema temperatūrą padarė Winston baterijos darbui, jos talpumas sumažėjo **43%**, galia sumažėjo **47%** ir iškrovimo laikas sutrumpėjo **41%**.

Gauti rezultatai leidžia daryti išvadą, kad Sinopoly gamintojo baterijos yra tinkamiausios naudojimui elektra varomame transporte įvairiomis temperatūros sąlygomis naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną.

6. Papildomai atliktų eksperimentų rezultatai parodė, kad naudojant optimalų darbinės įtampos diapazoną (2,8-3,6)V, eksperimentinių tyrimų rezultatai yra prastesni už rezultatus gautus naudojant gamintojų nurodomus darbinės įtampos diapazonus.

7. Apibendrinant visus rezultatus galima teigti, kad LiFePO_4 baterijas galima efektyviai naudoti elektra varomame transporte prie normalių temperatūrų. Tačiau naudojant šias baterija žemos temperatūros sąlygomis jų talpumas gali sumažėti iki puses nominalaus talpumo. Tyrimo metu buvo pastebėta, kad pakrovimo iš iškrovimo metu, baterijų korpuso temperatūra kilo keliais laipsniais Celsijaus, o prabuvus prie (-30 ± 2 °C) temperatūros ilgiau nei 20 val., baterijos užšąla. Siekiant išspręsti šias problemas, galima naudoti papildomas baterijų aušinimo ir šildymo sistemas.

Perspektyvoje yra numatyta papildyti eksperimentinių tyrimų stendą papildomais stiprintuvais, kas leis atlikti eksperimentinius tyrimus iškraunant baterijas esant aukštomis srovėmis.

LITERATŪRA

- Bazito F.F.C., Torresi R.M. 2006. Cathodes for lithium ion batteries: the benefits of using nano structured materials. Journal of the Brazilian Chemical Society, 17 vol., 4 nr., Sao Paulo.
- Borong W., Ying Z., Ning L. et al. 2011. Research on Low Temperature Performance of the F-doped LiFePO₄/C Cathode Materials. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 14 vol., 3 nr., 147-152 p.
- Cadex Electronics Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.04.13]. Prieiga per: batteryuniversity.com
- CALB, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.11.13]. Prieiga per: en.calb.cn
- Chengfeng L., Ning H., Chengyun W. et al. 2011. Effect of Mn²⁺-doping in LiFePO₄ and the low temperature electrochemical performances. Journal of Alloys and Compounds, 509 vol., 5 issue, 1897–1900 p.
- Degalų kainų statistika, [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.04.04]. Prieiga per: www.degalukainos.lt
- Elithion, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.01.05]. Prieiga per: liionbms.com
- Headway-Headquarters [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.04.10]. Prieiga per: headwayhw1.en.ec21.com
- iCharger New Zealand, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.04.12]. Prieiga per: www.icharger.co.nz
- Lietuvos Elektromobilių Asociacija [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.11.09]. Prieiga per: www.elektromobilis.org
- Linden D., Reddy T.B. 2002. Handbook Of Batteries, 3rd edn., 35 ch., New York: McGraw-Hill.
- Takahashi M., Tobishima S., Takei K. et al. 2001. Charakterization of LiFePO₄ as the cathode material for rechargeable lithium batteries. Journal of Power Sources 97-98, 508-511 p.
- MCM Electronics, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.01.14]. Prieiga per: www.mcmelectronics.com
- Mokslo naujienos [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.11.15]. Prieiga per: mokslasplius.lt
- Padhi A.K., Nanjundaswamy K.S., Goodenough J.B. 1996. LiFePO₄: A Novel Cathode Material for Rechargeable Batteries. 73 p.
- PowerStream Technology, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.11.15]. Prieiga per: www.powerstream.com
- Revolectrix Group [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.11.25]. Prieiga per: www.revolectrix.com

- SB LiMotive Co., Ltd. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.11.02]. Prieiga per: www.sblimotive.com
- Silberberg M. 2006. Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change, 4th edn., 935 p., New York: McGraw-Hill Education.
- Sinopoly Battery, Ltd. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.12.06]. Prieiga per: www.sinopolybattery.com
- Šutavičius Š. 2012. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.04.11]. Prieiga per: e-motion.lt
- Thermo Analytics, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.11.03]. Prieiga per: www.thermoanalytics.com
- Wei-Jun Z. 2010. Structure and performance of LiFePO₄ cathode materials: A review. Journal of Power Sources, 196 vol., 6 issue, 2962–2970 p.
- West Mountain Radio, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.11.28]. Prieiga per: www.westmountainradio.com
- Winston Battery, Ltd. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.12.19]. Prieiga per: en.winston-battery.com
- Woodbank Communications, Ltd. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012.04.12]. Prieiga per: www.mpoweruk.com
- Xiao-Zhen L., Zi-Feng M., Qiang G. et al. 2008. Low-temperature performance of LiFePO₄/C cathode in a quaternary carbonate-based electrolyte. Electrochemistry Communications, 10 vol., 5 issue, 691-694 p.
- 123A Systems, Inc. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.11.07]. Prieiga per: www.a123systems.com

PRIEDAI

1 priedas: publikacijos

Technologijų valdymo magistro studijų programos studijavimo metų, moksliniuose leidiniuose atspausdintos publikacijos:

1. Mumgaudis G., Bulbenkienė V., Kuprinavicius A., Zulkas E., Pečko A., Sokolov A. 2011. Energy Consumption Data Acquisition and Display System Development. Proceedings of 17th International Conference on Information and Software Technologies, 163-166 p., Kaunas, Lietuva, ISSN 2029-0063.
2. Bulbenkienė V., Pečko A., Zulkas E., Kuprinavičius A., Sokolov A., Mumgaudis G. 2011. Energy Sub-Metering Data Acquisition System. Electronics and Electrical Engineering, Kaunas: Technologija, 5 (110) nr., 99-103 p., Kaunas, Lietuva, ISSN 1392 – 1215.
3. Noreika V., Antonov I., Pečko A., Didžiokas R. 2012. Baterijų, tinkamų naudoti autotransporte, palyginamoji analizė. Klaipėdos universitetas: Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje VIII, 160-163 p., Klaipėda, Lietuva, ISSN 1822-4652.
4. Pečko A., Bulbenkienė V., Didžiokas R., Senulis A. 2012. Ličio geležies fosfato (LiFePO₄) baterijų iškrovimo proceso tyrimai prie normalios ir žemos temperatūros. Klaipėdos universitetas: Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje VIII, 164-168 p., Klaipėda, Lietuva, ISSN 1822-4652.

2 priedas: kompaktinė plokštelė

Kompaktinė plokštelė, kurioje pateikiami:

Darbo katalogas: „Pecko_Aleksej/..“.

Darbo aprašymas: „.../Pecko_Aleksej_magistrinis_darbas.docx“.