

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 629.113-83

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.036>

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

**В.Б. Павлов\***, докт. техн. наук, **О.Д. Подольцев\*\***, докт. техн. наук, **О.П. Западничук**, канд. наук з держ. упр., **В.Є. Павленко**

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net), [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua)

У роботі подано докладний опис літій-іонних акумуляторів та способи їхнього застосування в технічних пристроях різного призначення. Наведено базові технічні характеристики основних типів промислових літійєвих акумуляторів і показано, що нині на автономному електротранспорті знаходять застосування літій-залізо-фосфатні, літій-титанатні та літій-карбон-титанатні акумулятори. Також у роботі проведено аналіз результатів стендових випробувань літій-титанатних та літій-карбон-титанатних акумуляторів щодо їхнього температурного стану за різних значень зовнішньої температури та рівнів зарядно-розрядних струмів. Результати випробувань показали граничні значення температури нагрівання акумуляторів, а також зміну зарядного процесу за мінусової температури навколишнього середовища, що вимагає проведення необхідних заходів (охолодження або підігріву) у разі комплектації тягової акумуляторної батареї з випробуваних елементів. Бібл. 8, рисунок, табл. 12.

**Ключові слова:** літійєві акумулятори, теплові характеристики, карбон, титанат, швидкий заряд, розряд, температура, ємність акумулятора.

У 60...80-і роки минулого століття на електромобілях, що випускалися та експлуатувалися (у невеликих кількостях), як джерела живлення здебільшого застосовувалися свинцево-кислотні, нікель-кадмієві та нікель-залізні акумуляторні батареї (АБ) з енергоємністю 30...45 Вт-ч/кг і перезарядними циклами у кількості 500...800 циклів.

Промислове виробництво літійєвих акумуляторів стартувало в 1990 році, коли японська компанія *Sony* розпочала їхнє масове виготовлення, але для автономного електротранспорту тягові літійєві акумулятори масово почали впроваджуватися лише в 21 сторіччі, починаючи приблизно з 2019 року.

На сьогоднішній день прийнято розрізняти два типи літійєвих АБ – літій-іонні та літій-полімерні.

Літій-полімерний акумулятор [1] (літій-іонний полімерний акумулятор (*lithium-ion polymer battery*); абревіатури: *Li-Po*, *Li-polymer*, *LIP*, *Li-poly* і т.д.) – це вдосконалена конструкція літій-іонного акумулятора. Як електроліт у ньому використовується полімерний матеріал. Застосовується в мобільних телефонах, цифровій техніці, радіокерованих моделях та ін. Звичайні побутові літій-полімерні акумулятори не здатні віддавати великий струм, але існують спеціальні силові літій-полімерні акумулятори, які можуть віддавати струм у 10 і навіть 130 разів, що перевищує чисельне значення ємності в ампер-годинах. До переваг *Li-Po* слід віднести велику щільність енергії на одиницю маси, низький самозаряд, слабо виражений ефект пам'яті, незначний перепад напруги впродовж розряду та, за даними виробників, досить широкий діапазон робочих температур (від -20 до +40 °С). До недоліків – пожежонебезпечність під час перезаряджання та/або перегрівання. Для боротьби з цим явищем усі побутові акумулятори забезпечуються вбудованою електронною схемою, яка



запобігає перезаряду та перегріванню внаслідок занадто інтенсивного заряду. З цієї причини вони вимагають спеціальних алгоритмів зарядки (зарядних пристроїв).

Використання іонно-літєвих акумуляторів як тягового джерела живлення електромобілів на сьогоднішній день є найбільш масовим, що пояснюється насамперед високими питомими енергетичними характеристиками цих акумуляторних батарей, великим ресурсом роботи та незначним саморозрядом порівняно зі свинцево-кислотними, нікель-залізними та нікель-металогідридними АБ.

Базові технічні характеристики основних типів промислових літєвих акумуляторних батарей надано в табл. 1 [2, 3].

Найчастіше на автономному електротранспорті застосовуються літій-залізо-фосфатні та літій-титанатні акумулятори. Проте останнім часом знаходять все більше застосування й літій-карбон-титанатні АБ.

Таблиця 1

Абревіатура АБ	LCO	NCA	NMC	LNO	LEP	LTO
Назва	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide	Lithium Manganese Spinel	Lithium Iron Phosphate	Lithium Titanate
Напруга одиничного елемента, В: - номінальна - робочий діапазон	3,6 3,0 – 4,2	3,6 3,0 – 4,2	3,6- 3,7 3,0 – 4,2	3,7 3,0 – 4,2	3,2-3,3 2,5 – 3,65	2,4 1,8 – 2,85
Питома енергія за нормованого струму розряду	150-240 Вт·год/кг	200-260 Вт·год/кг	150-240 Вт·год/кг	100-150 Вт·год/кг	90-120 Вт·год/кг	70-80 Вт·год/кг
Ресурс: заряд/розряд	500-1000	500	1000-2000	300-700	1000-2000	3000-11000

Літій-титанатний акумулятор – варіант літій-іонних акумуляторів, що використовує титанат натрію ( $Li_4Ti_5O_{12}$ ) як анод. Для збільшення площі анода має нанокристалічну будову. Таке рішення дає змогу забезпечити площу поверхні анода до  $100 \text{ м}^2/\text{г}$  порівняно з  $3 \text{ м}^2/\text{г}$  для вуглецю, що сприяє значному збільшенню швидкості перезарядки та забезпеченню високої щільності струму. Станом на 2017 рік літій-титанатні батареї здатні забезпечити густину енергії до 175 Вт/л. Крім того, ці акумулятори мають високу надійність і можуть працювати за більш низьких температур, ніж класичні іонні літій ( $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Недоліком літій-титанатних акумуляторів є більш низька робоча напруга (2,4 В), що призводить до меншої питомої енергії (близько 30...110 Вт·год/кг), ніж у звичайних літій-іонних батарей, що мають стандартну напругу (3,7 В).

Літій-карбон- титанатний акумулятор (*Carbon titanate cell LPCO*) є другим поколінням літій-титанатних акумуляторів, розроблених американською компанією Microvast та виготовлених на основі пористого вуглецю титанату літію  $Li_4Ti_5O_{12}$  (*porous carbon*).

Як анод у карбон титанатному акумуляторі використано модифікований пористий вуглець із розміром частинок й морфологією, подібними до класичного графіту, і площею поверхні, що в 20 разів перевищує площу поверхні графіту. Велика площа поверхні забезпечує збільшений канал, який значно підвищує рухливість та інжекцію літій-іона, що допомагає акумулятору досягти високої швидкості заряджання та тривалої роботи.

Завдяки таким технологіям вдалося значно збільшити щільність енергії, що накопичується, зменшити масу та габарити карбон-титанатного акумулятора. Водночас сталося незначне, порівняно з літій-титанатним акумулятором, зниження ресурсу, який у карбон-титанаті складає 10000 циклів.

Робочий діапазон напруг карбон-титанатного акумулятора складає 2,7...4,3 В, що відповідає діапазону стандартного літій-іонного акумулятора. Це дає змогу використовувати поширені плати захисту *BMS* (*battery management system*), які розроблено для літій-іонних батарей. Але, незважаючи на перевагу карбон-титанатної технології, літій-титанатна

розробка від *Toshiba SCiD* залишається на сьогодні акумулятором із найвищим строком служби поміж усіх технологій, що виробляються серійно, виробники яких досі не перевищили ресурсу в 25000 повних циклів [8].

У табл. 2 показано зведені технічні характеристики літій-залізо-фосфатних АБ різних виробників [4-7].

Зважаючи на високу надійність і широкий діапазон робочих температур літій-титанових та літій-залізо-фосфатних акумуляторів, а також спираючись на їхню можливість підтримувати майже стабільний рівень напруги до повного розряду, виробники застосовують їх як накопичувачів енергії в системах автономного електроживлення електромобілів.

Таблиця 2

№	Назва виробника	Ємність $C$ , А·год	Напруга $U$ , В	$\frac{E}{\text{Вт} \cdot \text{год}}$ $\frac{\text{кВт}}{\text{год}}$	$E$	Ресурс: заряд/розряд
1	Shenzhen RJ Energy Co.Ltd	240	3,2	-	-	<6000
2	IMREN	4,2	3,7	-	-	500
3	Victron Energy	6,0	12,8	64	-	<5000
4	Ultralife	55,8	12,8	90	-	<5000

У той же час, ураховуючи значно більший ресурс літій-титанових акумуляторів, ніж літій-залізо-фосфатних, можна припустити, що надалі їм віддаватимуть більшу перевагу за існуючих темпів розвитку електротранспорту різного типу.

Тому **метою цієї роботи** є стендові випробування літій-титанових і літій-карбонат-титанових акумуляторів щодо їхнього температурного стану під час заряду та розряду різними за величиною струмами за різних значень температури навколишнього середовища та комплектації зазначеними елементами тягових акумуляторних батарей, призначених для електротранспорту, що працює в жорсткому режимі експлуатації.

**Хід експерименту.** Для вимірювання температурного режиму літійових акумуляторних батарей було створено стенд, що включає блоки акумуляторних батарей АБ1 і АБ2 із чотирьох елементів у кожному блоці з напругою 12...16 В; регульоване джерело постійної напруги 1...100 В і струмом до 100 А; вимірювальні прилади – вольтметр М42300, 1,5; амперметр 3538, 05 ГОСТ 8711-78; пірометр 66 IR Thermometer; електрошафу (максимальна температура +500 °С); морозильну камеру (мінімальна температура -15 °С). Струм заряду та розряду змінювався від 1 до 3 С, де С – ємність акумулятора. За С = 21 А·год струм 1С ≈ 21 А струм 3С ≈ 63 А. Для отримання об'єктивних (середніх) значень експеримент у кожному режимі часто проводився декілька разів, що вимагало чимало часу.



У подальшому: АБ1 – літій-титанатні акумулятори, АБ2 – літій-карбонат-титанатні акумулятори.

Зовнішній вигляд одного елемента літій-титанатного акумулятора показано на рисунку.

Елемент літій-карбонат-титанатного акумулятора аналогічний.

У табл. 3 показано результати заряду АБ1 струмом 3С, а у табл. 4 – розряд відразу після заряду. Розряд струмом 1С після відстою протягом 12 годин показано в табл. 5.

Таблиця 3

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/ розряду, А	Час заряду/ розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ1. Заряд ЗС								
1	2,91	4,21	20	48	63,01	20	21	20
2	3,01	4,31	20	48	62,49	20	21	20
3	3,10	4,30	20	47	63,10	20	21	20
4	2,87	4,31	20	49	62,90	20	21	20
5	2,93	4,32	20	48	63,00	20	21	20
6	2,82	4,28	20	49	63,02	20	21	20
7	2,91	4,32	21	48	62,90	20	21	21
8	2,93	4,31	21	50	63,00	20	21	21
9	3,01	4,30	21	49	63,10	20	21	21

Таблиця 4

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/ розряду, А	Час заряду/ розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ1. Розряд відразу після заряду ЗС								
1	4,31	2,75	40	52	63,08	20	21	20
2	4,28	2,68	40	53	62,90	20	21	20
3	4,30	2,70	40	52	63,10	20	21	20
4	4,35	2,71	35	49	62,90	20	21	19
5	4,21	2,68	35	48	63,00	20	21	19
6	4,30	2,70	35	49	63,20	20	21	19

Таблиця 5

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/ розряду, А	Час заряду/ розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ1. Розряд 1С після нічного відстою – 12 годин								
1	4,00	2,70	21	31	21,20	60	21	21
2	4,00	2,71	21	30	21,00	60	21	21
3	4,10	2,68	21	30	21,10	60	21	21
4	4,00	2,75	20	31	21,00	60	21	20
5	4,08	2,70	20	31	21,20	60	21	20
6	4,10	2,71	20	30	20,90	60	21	20
7	4,05	2,70	19	30	21,30	60	21	19
8	4,00	2,70	19	31	21,10	60	21	19

Із наведених таблиць видно, що за температури навколишнього середовища 19...21 °С у разі заряду та розряду струмом ЗС, температура акумулятора незначно відрізняється (на 2...3 °С вище під час розряду), у той же час струм розряду 1С незначно впливає на підвищення температури елемента, як показано в табл. 5.

Аналогічні результати з випробування літій-карбонат-титанатного акумулятора наведено в табл. 6 і 7. Слід відзначити дещо підвищену температуру (на 2...3 °С) акумуляторів АБ2 під час розряду порівняно з елементами АБ1 (табл. 5).

Таблиця 6

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/розряду, А	Час заряду/розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ2. Заряд 1С								
1	3,47	4,30	19	24	21	60	21	19
2	3,20	4,31	19	24	21	60	21	19
3	3,00	4,28	19	24	21	60	21	19
4	3,33	4,32	20	25	21	60	21	20
5	3,40	4,31	20	24	21	60	21	20
6	3,29	4,30	19	24	21	60	21	19
7	3,43	4,29	19	25	21	60	21	19
8	3,45	4,30	19	24	21	60	21	19

У табл. 8–10 показано результати випробувань за підвищеної температури навколишнього середовища до +40 °С.

Із таблиць видно, що під час заряду струмом 1С (табл. 8), як і за зовнішньої температури 20 °С (табл. 6), нагрів елементів не перевищує 4...5 °С, а під час розряду струмом 3С (табл. 9) різниця температур елементів дуже суттєва – до 10 °С, (порівняно із зарядом табл. 8), відповідно відрізняються й показники нагріву під час розряду струмом 2С і 3С (табл. 9, 10) у бік збільшення відповідно до підвищення струму розряду.

У табл. 11 показано заряд АБ1 струмом 1С та 3С за початкової температури акумулятора від -12 до -4 °С, а в табл. 12 аналогічні показники надано для АБ2 і струму 3С.

Таблиця 7

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/розряду, А	Час заряду/розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ2. Розряд 3С								
1	4,25	2,71	22	54	63	20	21	20
2	4,31	2,68	22	55	63	20	21	20
3	4,25	2,70	20	54	63	20	21	20
4	4,09	2,73	20	54	63	20	21	20
5	4,29	2,70	19	54	63	20	21	19
6	4,10	2,72	19	55	63	20	21	19
7	4,20	2,70	20	55	63	20	21	19

Таблиця 8

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/розряду, А	Час заряду/розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ 2. Заряд 1С. Теплові випробування +40 °С								
1	3,21	4,29	40	45	21	60	21	40
2	3,40	4,30	40	44	21	60	21	40
3	3,20	4,30	40	45	21	60	21	40
4	3,29	4,31	40	46	21	60	21	40
5	3,45	4,30	40	45	21	60	21	40
6	3,29	4,28	40	44	21	60	21	40
7	3,24	4,31	40	45	21	60	21	40

Таблиця 9

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/розряду, А	Час заряду/розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ 2. Розряд 3С								
1	4,22	2,71	40	66	63	20	21	40
2	4,25	2,70	40	67	63	20	21	40
3	4,22	2,70	40	67	63	20	21	40
4	4,21	2,72	40	66	63	20	21	40
5	4,26	2,71	40	65	63	20	21	40
6	4,21	2,70	40	67	63	20	21	40
7	4,22	2,71	40	66	63	20	21	40

Із наведених таблиць 11 і 12 видно, що в межах початкових вимірюваних температур (-12, -7 і -4 °С) істотних змін у зарядному процесі не відбулося, оскільки температура АБ відносно швидко досягала значення температури навколишнього середовища (18...20 °С). Водночас, якщо експлуатація акумуляторів триває за мінусової температури -20...-40 °С, то їхня ємність може знижуватися на 20...30 %, що вимагає підігріву пластин.

Таблиця 10

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/розряду, А	Час заряду/розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ 2. Розряд 2С								
1	4,25	2,70	40	62	42	40	21	40
2	4,28	2,70	40	61	42	40	21	40
3	4,24	2,71	40	62	42	40	21	40
4	4,27	2,72	40	63	42	40	21	40
5	4,29	2,73	40	64	42	40	21	40
6	4,21	2,70	40	63	42	40	21	40
7	4,21	2,72	40	62	42	40	21	40

Таблиця 11

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/розряду, А	Час заряду/розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ 1 -12 °С – охолодження 18 годин. Заряд 1С								
1	3,68	4,30	-12	30	10	120	21	18
АБ1. Заряд 3С								
2	3,10	4,30	-7	42	63,00	20	21	18

Таблиця 12

№ п/п	Початкова напруга, В	Кінцева напруга, В	Початкова температура, °С	Кінцева температура, °С	Струм заряду/розряду, А	Час заряду/розряду, хв	Ємність АБ, А·год	Температура навколишнього середовища, °С
АБ2. Заряд 3С								
1	3,40	4,31	-4	47	63	20	21	19
2	3,01	4,30	-8	50	63,10	20	21	20

Через це було проведено випробування нагрівальних елементів пластинчастого типу – плівкових і матер'яних, які можуть закладатися між акумуляторними пластинами під час збирання тягової батареї.

Випробування показали, що:

- нагрівальні елементи (плівкові та матер'яні) у відкритому стані за живлення від джерела 12 В нагрівалися до 50...60 °С, споживаний струм становив 1,8 А для плівкового елемента й 2,6 А для матер'яного;

- дві АБ із нагрівальним елементом між ними прогрівалися після включення від початкової температури -5 до +4 °С за 10...15 сек.;

- нагрівальні елементи за напруги 1,7...4 В і струму 0,5 А мали нагрів 25...30 °С, а за напруги 3,35...7,5 В – 33...49 °С.

**Висновки.** У результаті проведених випробувань акумуляторних батарей АБ1 та АБ2 можна відзначити таке:

- АБ мають досить стабільні показники за ємністю та температурою нагріву в разі заряду та розряду струмом 1С та 3С;

- АБ за заряду 1С нагрівалися до 24...25 °С, а за заряду 3С температура іноді досягала 55 °С (за температури навколишнього середовища 18...20 °С);

- теплові випробування за 40 °С АБ2 показали, що в разі заряду 1С температура елемента досягала 44...45 °С, а в разі заряду 2С – 62...63 °С, в разі розряду 3С температура елемента досягала 66...67 °С;

- за початкової температури -4 °С і заряду 3С прогрів АБ2 відбувався за 2...3 хвилини за постійного зниження опору до режиму заряду, що встановився. Істотного зменшення ємності АБ за температури -12, -4 °С не відзначалося.

Таким чином, результати проведених випробувань дають підставу констатувати, що елементи АБ1 і АБ2 можуть бути використані для формування акумуляторної батареї великої енергоємності з урахуванням заходів з охолодження за температури навколишнього середовища до +40 °С і підігріву за мінусової температури. Водночас для кожного окремого блока АБ, залежно від призначення та експлуатаційних умов, інтенсивність повітряного потоку визначається максимальною температурою елемента, а підігрів елементів здійснюється шляхом чергування акумуляторних та нагрівальних елементів, укладених в одному блоці. Нагрівальні елементи можуть підключатися до джерела живлення різної напруги.

*Фінансується за держбюджетною темою “Розвиток теорії електротехнологічних процесів та розроблення ефективних електроплавильних і електрозарядних систем з керованим електромагнітним впливом” (шифр “Елтех”), що виконується за Постановою Президії від 29.06.2021 р., протокол № 8. Державний реєстраційний номер роботи 0122U000839.*

1. Щербань А.П., Ларін В.Ю. Принципи роботи та особливості використання літій-полімерних акумуляторів. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 3/2 (23). С. 83–84.
2. Інтернет ресурс. Режим доступу: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
3. Chao-Yang Wang and other. «A Fast Rechargeable Lithium-Ion Battery at Subfreezing Temperatures». *Journal of The Electrochemical Society*, 163 (9) A1944-A1950 (2016), Manuscript submitted May 4, 2016; revised manuscript received June 10, 2016. Published July 13, 2016. Режим доступу: <http://jes.ecsdl.org/content/163/9/A1944.full.pdf+html>.
4. Інтернет ресурс. Режим доступу: <http://www.amazon.com/Lithium-PhosphateLiFePO4-Battery-Prismatic/dp/B07RZR4TZW>
5. Інтернет ресурс. Режим доступу: [http://www.alibaba.com/product-detail/lithium-iron-phosphate-22650-3-7V\\_60793448300.html?spm=a2700.7735675.normalList.4.6dle48d8Q2RGjL&s=p](http://www.alibaba.com/product-detail/lithium-iron-phosphate-22650-3-7V_60793448300.html?spm=a2700.7735675.normalList.4.6dle48d8Q2RGjL&s=p)
6. Інтернет ресурс. Режим доступу: <http://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-12,8-&-25,6-Volt-lithium-iron-phosphate-batteries-Smart-EN.pdf>
7. Інтернет ресурс. Режим доступу: [http://www.ultralifecorporation.com/PrivateDocuments/BR\\_Lead\\_Acid\\_Replacemant.pdf](http://www.ultralifecorporation.com/PrivateDocuments/BR_Lead_Acid_Replacemant.pdf)
8. [Карботитанатный аккумулятор. Циклопедия cyclowiki.org > wiki > Карботитанатный аккумулятор](http://cyclowiki.org/wiki/Карботитанатный_аккумулятор)

## EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL CHARACTERISTICS OF LITHIUM-ION BATTERIES

V.B. Pavlov, O.D. Podoltsev, O.P. Zapadynchuk, V.E. Pavlenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net), [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua)

*The work gives a detailed description of lithium-ion batteries and methods of their use in technical devices of various purposes. The basic technical characteristics of the main types of industrial lithium batteries are presented and it is shown that lithium-iron-phosphate, lithium-titanate and lithium-carbon-titanate batteries are currently used in autonomous electric vehicles. The work also analyzed the results of bench tests of lithium-titanate and lithium-carbon-titanate batteries in terms of their temperature state at different values of external temperature and different levels of charge-discharge currents. The results of the tests showed the limit values of the battery heating temperature, as well as a change in the charging process at sub-zero ambient temperatures, which requires the necessary measures - cooling or heating - when assembling the traction battery from the tested elements. Bibl. 8, figure, tables 12.*

**Key words:** lithium batteries, thermal characteristics, carbon, titanate, fast charge, discharge, temperature, battery capacity.

1. Shcherban A.P., Larin V.Yu. Principles of operation and features of the use of lithium-polymer batteries. *Technological audit and production reserves*. 2015. No. 3/2 (23). WITH. Pp. 83–84. DOI<sup>^</sup> <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.42517>
2. Internet resource. Access mode: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
3. Chao-Yang Wang and other. “A Fast Rechargeable Lithium-Ion Battery at Subfreezing Temperatures”. *Journal of The Electrochemical Society*, 163 (9) A1944-A1950 (2016), Manuscript submitted May 4, 2016; revised manuscript received June 10, 2016. Published July 13, 2016. Access mode: <http://jes.ecsdl.org/content/163/9/A1944.full.pdf+html>. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0681609jes>
4. Internet resource. Access mode: <http://www.amazon.com/Lithium-PhosphateLiFePO4-Battery-Prismatic/dp/B07RZR4TZW>
5. Internet resource. Access mode: [http://www.alibaba.com/product-detail/lithium-iron-phosphate-22650-3-7V\\_60793448300.html?spm=a2700.7735675.normalList.4.6dle48d8Q2RGjL&s=p](http://www.alibaba.com/product-detail/lithium-iron-phosphate-22650-3-7V_60793448300.html?spm=a2700.7735675.normalList.4.6dle48d8Q2RGjL&s=p)
6. Internet resource. Access mode: <http://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-12,8-&-25,6-Volt-lithium-iron-phosphate-batteries-Smart-EN.pdf>
7. Internet resource. Access mode: [http://www.ultralifecorporation.com/PrivateDocuments/BR\\_Lead\\_Acid\\_Replacemant.pdf](http://www.ultralifecorporation.com/PrivateDocuments/BR_Lead_Acid_Replacemant.pdf)
8. Carbotitanate battery. Cyclopedia. [cyclowiki.org › wiki › Carbotitanatny\\_accumulator](http://cyclowiki.org/wiki/Carbotitanatny_accumulator)

Надійшла: 21.03.2023

Прийнята: 29.03.2023

Submitted: 21.03.2023

Accepted: 29.03.2023