

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

**Базылов Алибек Колбаевич**

магистрант, Казахский агротехнический университет имени Сакена Сейфуллина, Казахстан, г. Нур-Султан

**Аннотация.** Для серийного производства электромобилей разработка технологии литий-ионных элементов для достижения высокой плотности энергии упаковочных аккумуляторов имеет решающее значение и требует значительных исследований и разработок. В данной статье рассматриваются последние разработки в области клеточных технологий и катодной химии для производства тяговых литий-ионных аккумуляторов. Производятся неразрушающие испытания и сравнительный анализ наиболее важных характеристик аккумуляторов с известной литий-ионной электрохимией. Представлены преимущества и недостатки различных типов литий-ионных клеток. Сделаны выводы о степени применимости литий-ионных батарей соответствующих типов в применениях EV / HEV.

**Abstract.** For the mass production of electric vehicles, the development of lithium-ion cell technology to achieve a high energy density of packaging batteries is critical and requires significant research and development. This article discusses the latest developments in the field of cell technology and cathodic chemistry for the production of traction lithium-ion batteries. Non-destructive tests and comparative analysis of the most important characteristics of batteries with known lithium-ion electrochemistry are carried out. The advantages and disadvantages of various types of lithium-ion cells are presented. Conclusions are drawn on the degree of applicability of lithium-ion batteries of the respective types in EV / HEV applications.

**Ключевые слова:** литий-ионная батарея; EV / HEV- Электрические и гибридные транспортные средства; BMS-система управления батареями.

**Keywords:** lithium-ion battery; EV / HEV- Electric and hybrid vehicles; BMS battery management system.

### **Введение**

Улучшенное производство электрических и гибридных транспортных средств (EV / HEV) зависит от разработки литий-ионных батарей для хранения и управления энергией. Хотя литий-ионная технология является относительно молодой, она обладает значительным потенциалом как для снижения затрат, так и для повышения удельной энергии (удельная энергия Вт / кг энергии) за счет рационализации производственного процесса. Удельная энергия является ключевым показателем при производстве литий-ионных элементов для EV. Преимущество плотности энергии заключается в том, что требуется меньше электролита, что обеспечивает более быструю передачу ионов от анода к катоду, что при сборке приводит к снижению массы элемента и, следовательно, к снижению общего веса аккумуляторного блока для EV. В последние годы был достигнут большой прогресс в разработке технологии литий-ионных элементов для достижения высокой плотности энергии.

### **Цель работы.**

Рассмотреть характеристики элементов и химический состав катодных материалов для производства тяговых литий-ионных аккумуляторов. Провести тесты батарей с помощью самых популярных электрохимических элементов на литий-ионных элементах, анализируя преимущества и недостатки различных типов элементов. Сделать выводы о степени применимости соответствующих типов литий-ионных аккумуляторов в приложениях EV / HEV.

### **Предмет исследования, оборудование и методология**

Чтобы определить наиболее перспективные элементы для применения EV / HEV, были проведены неразрушающие испытания основных функциональных характеристик - характеристик внутреннего сопротивления и зарядки / разрядки элементов разной конструкции и различных клеточных электрохимий наиболее популярных типов Li. - Ионные батареи для приложений EV / HEV.

### **Характеристики наиболее часто используемых элементов батарей для EV / HEV**

Наибольшее распространение в производстве батарей EV / HEV получили следующие типы литий-ионных элементов: LFP, NCA и NMC [4,5].

Наиболее распространенная классическая ячейка LCO с катодным материалом LiCoO<sub>2</sub> имеет высокую удельную энергию (240 Вт / ч / кг), но не подходит для применений EV / HEV из-за ее склонности к воспламенению и вредности. Основные характеристики ячейки следующие:

- Удельная энергия. Эта функция в последнее время оказалась наиболее важной из-за разработки систем управления батареями BMS, которая помогла устранить серьезные недостатки в увеличении плотности (нагрев, зажигание и т. Д.).

- Химический состав катодного материала. Это зависит от удельной энергии элемента и, следовательно, максимального диапазона EV с одним зарядом [4,5]. - Размер ячейки. До недавнего времени призматический дизайн клеток считался наиболее подходящим для EV. Однако он подходит только для ячеек LFP, которые пожаробезопасны, но имеют низкую плотность энергии. Причина состоит в том, что в этой конструкции существует большая вероятность микроскопических «коротких замыканий» между электродами в зонах складывания и вызывающих эффект «летучего тепла» (самопроизвольное повышение температуры и разрушение ячейки) [6]. Следовательно, большинство NCA и NMC для EV-ячеек имеют цилиндрическую форму, где между электродами нет резких складок, и тепловыделение менее вероятно. Наиболее распространенными при ЭВ являются клетки размером 18650 [11].

- Внутреннее сопротивление (импеданс). Это важная функциональная особенность клетки. Необходимо знать полное сопротивление элемента, чтобы рассчитать выработку тепла челюсти или потерю мощности в элементе. С возрастом клетки его внутреннее сопротивление увеличивается. Это уменьшает способность получать и удерживать заряд, но OCV будет отображаться как обычно и даже выше, несмотря на уменьшенную емкость батареи. Периодическое сравнение фактического внутреннего сопротивления с новым сопротивлением батареи покажет любое ухудшение функциональности батареи [8].

### **Объект исследования**

Объектом исследования являются LFP, NCA и NMC типа 18650 цилиндрических ячеек лития и большая призматическая линия клеток LFP LFP с материалом катода LiFePO<sub>4</sub>. Цилиндрические ячейки являются новыми, коммерчески приобретаемыми различными дистрибьюторами [1,2,3]. Из использованного аккумулятора для электромобиля были испытаны два больших призматических элемента с наибольшей разницей в номинальном напряжении при напряжении OCV результаты показаны в таблице 1. Клетки тестируются без протекторов и систем управления. Испытания подлежат как минимум двум клеткам вида.

*Таблица 1.*

**Коммерческие характеристики вида Литий-ионные элементы, используемые для EV**

Тип	Формат, мм	Коммерческое название	Номинал
LFP	Φ12x65	LFP18650 Zelle	3.2
NCA	Φ18x65	NCR18650A	3.6
NMC	Φ18x65	INR18650- 29E	3.7

### Методология экспериментальных исследований

- Определить кривую заряда / разбавления и оценить, в какой степени

характеристики новых клеток соответствуют характеристикам производителя;

- Провести сравнительный анализ кривых зарядки / разбавления для трех типов наиболее распространенных в практике применения электромобилей литий-ионных элементов с различной электрохимией для выявления различий в их поведенческих моделях во время зарядки / разбавления.

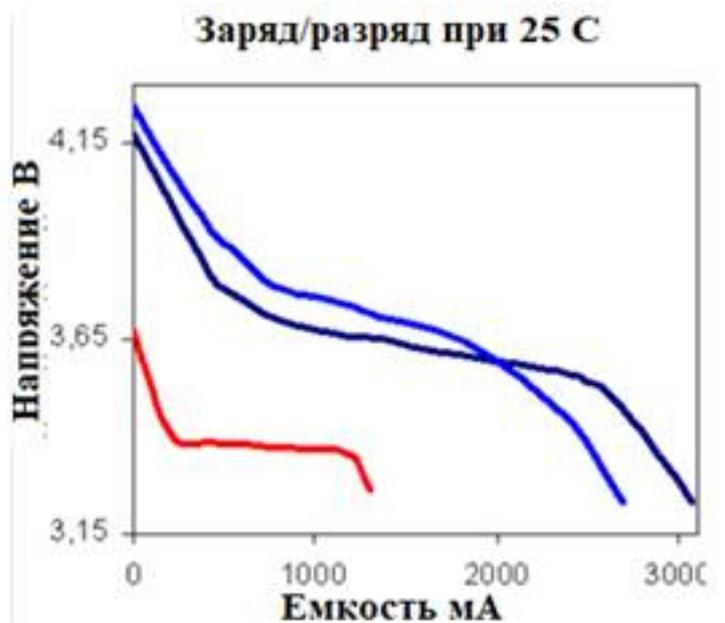
Все ячейки должны быть полностью заряжены до допустимого уровня до начала тестирования. Затем формат ячейки 18650 разбавляется током 0,25 C, причем C - это емкость аккумулятора, взятая из данных изготовителя. Развести в течение от 1 до 4 часов (до 250 минут) в зависимости от емкости типов клеток. Испытание проводится с помощью устройства, показанного на рисунке 1 (б). Результаты теста показаны на рисунке 2.



а

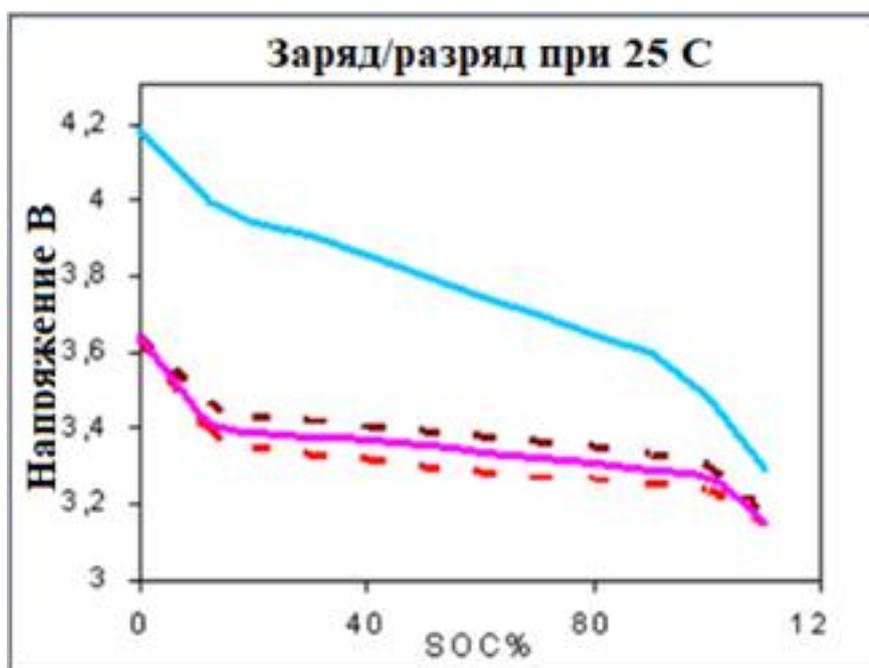
б

**Рисунок 1. Изображения блока измерения импеданса и характеристики зарядки / разбавления литий-ионных элементов. 1 а) для крупных призматических клеток; РИСУНОК. 2.б) - Для цилиндрических ячеек формата 18650.**



**Рисунок 2. Кривые нагрузки / разряда цилиндрической ячейки формата 18650 с различными катодными материалами**

На рис. 3 показано напряжение элемента во время цикла предварительного тестирования с током зарядки / разрядки 25 А большого элемента LFP и током зарядки / разрядки 0,8 А малого элемента NCA. Напряжения элемента отображаются в зависимости от состояния заряда (SOC). Это позволяет напрямую сравнивать уровни напряжения между зарядом и разрядкой в одном и том же состоянии заряда двух типов элементов. В большой призматической ячейке время зарядки и разбавления на короткое время останавливается на каждые 10% изменения емкости для измерения напряжения и анализа релаксации при OCV [11]. В ячейке типа NCA релаксация не требуется, поскольку кривая зарядки соответствует кривой разбавления, то есть не требуется никакого специального цикла зарядки / разбавления, как в большой ячейке.



**Рисунок 3. Развитие клеточного напряжения при токе заряда / разряда 0,25С с**

### 3. Определение внутреннего сопротивления

Электрический метод [8] используется для определения импеданса. Чтобы определить внутреннее сопротивление, сначала необходимо измерить OCV ячейки. Затем нагрузка должна быть подключена через ячейку, что приведет к течению тока. Это уменьшит напряжение элемента из-за падения ИК-напряжения на элементе, которое соответствует внутреннему сопротивлению элемента. Затем напряжение ячейки должно быть измерено снова, когда ток работает. Импеданс  $R_{in}$  рассчитывается по закону Ом для V-образной ячейки между двумя измерениями и для разности cell V-ячейки в напряжении I тока, протекающего через ячейку, согласно формуле (1).

$$R_{in} = DV_{cell}/I, \text{ m}\Omega \quad (1)$$

Для теста импульсный ток 1,5 ° C подается на каждую отдельную ячейку в течение 2 секунд. Использование времени импульса 2 секунды достаточно для стабилизации напряжения элемента, но оно оказывает незначительное влияние на SOC. Импульсный ток для больших ячеек LFP составляет 150 А, а ток для маленького АНБ - 4,5 А.

Анализ экспериментальных результатов и дискуссий

Средние значения данных испытаний импеданса и удельной энергии типов ячеек, рассчитанные по кривым зарядки / разбавления, представлены в таблице 2. Анализ экспериментальных результатов, приведенных на рисунке 3, Показывает, что кривые зарядки / разбавления различных типов цилиндрических клетки отличаются.

**Таблица 2.**

**Анализ результатов**

Тип	Катодные материалы	Емкость мА	Импеданс $R_{in}$ , mΩ	Энергия Вт
LFP	LiFePO <sub>4</sub>	1.4	40	110
NCA	Li(NiCoAl)O <sub>2</sub>	3.1	79	260
NMC	Li(NiCoMn)O <sub>2</sub>	2.9	75	220

Номинальная (рабочая) площадь ячеек LFP является прямолинейной с очень небольшим наклоном, т.е. Е. напряжение меняется очень мало в течение времени зарядки / разрядки. Также видно, что характеристики клеток NCA и NMC напоминают и различаются только по емкости [4]. Следовательно, фактические характеристики кривой зарядки соответствуют эксплуатационным характеристикам, указанным производителем, и могут быть проведены следующие испытания.

На рисунке 3 представляет кривую заряда / разряда напряжения элемента во время тестирования при заряде / разряде постоянного тока 0,25 ° C с большими разрывами элемента LFP и без паузы (непрерывного цикла) на небольшом элементе NCA. Отличие от графика на рисунке 2 состоит в том, что напряжение на этом графике зависит от SOC, а не от времени достижения максимальной емкости. Верхняя кривая отсечки циклов ячейки LFP представляет заряд (коричневый), а нижняя кривая отсечки (красный) представляет разрыв с минутным перерывом при подсчете OCV. Измерения напряжения ячейки в течение цикла испытаний показывают, что ячейка не достигает баланса в конце пауз, если шаг отклика приостанавливается на 1 минуту, что очень мало. Это делает тест более сложным и игнорирует его, поскольку увеличивает продолжительность цикла тестирования до нескольких дней. Необходимо ускорить время цикла. Это делается с помощью специального алгоритма, в котором непрерывные средние (фиолетовая линия) представляют собой интерполяцию между уровнями напряжения в конце пауз длительностью 1 минута. Это

позволяет испытательному циклу проходить в очень короткое время без больших релаксационных пауз [4,10]. Также из анализа кривых заряда / разбавления двух ячеек подтверждается, что номинальная площадь кривой ячейки NCA имеет нелинейный характер, а область номинальной кривой ячейки LFP имеет линейную характеристику. Это означает, что оценка состояния нагрузки (SOC) в ячейках NCA становится намного проще благодаря измерению только напряжения, тогда как для ячеек LFP из-за небольшого наклона кривой разбавления измерение SOC только при измерении напряжения является неточным. Также необходимо измерить количество электроэнергии (счет Кулона), что усложняет алгоритм и программное обеспечение соответствующей системы управления (BMS).

Рисунок 1 (а) монитора графически показывает импульсы двух больших клеток LFP ( $\text{LiFeYPO}_4$ ), а на рисунке 1 (б) импульсы двух небольших клеток NCA. В больших клетках наблюдается более медленная релаксация OCV, чем в маленьких клетках. Смотрите также, большее внутреннее сопротивление одной ячейки LFP, имеющей более высокий OCV. Следовательно, более крупные элементы с более высоким напряжением имеют более высокое внутреннее сопротивление или плохо сбалансированы. Маленькие клетки NCA имеют точно такой же импеданс и немедленно расслабляются, что означает их высокое качество. Из данных в табл. 2 показывает меньшее сопротивление клеток LFP по сравнению с другими видами. Это означает более длительный срок службы и большее количество циклов зарядки / разрядки этого типа элементов.

## **Вывод**

Клетки LFP отличаются высокой пожарной безопасностью и надежностью. Их функциональность очень хорошая, они имеют большое количество циклов зарядки / разрядки, и до 1-2 лет назад они считались наиболее подходящими для приложений EV / HEV [8,10]. Однако у них есть один существенный недостаток - низкая удельная энергия, что делает эту батарею непопулярной для современных электромобилей. Особенно сложно сбалансировать и требовать сложного программного обеспечения для определения SOC, больших призматических клеток LFP.

Ячейки NCA обладают высокой плотностью энергии и широко используются в бытовой электронике. Они составляют основу аккумуляторных батарей Panasonic в современных электромобилях двигателей Tesla [11,12].

Ячейки NMC также подходят для использования в EV. NMC Chemistry используется Renault и BMW для EV. По данным Samsung, текущая удельная мощность его NMC составляет 130 Втч / кг (примерно половина NCA Panasonic, но к 2019/2020 гг. Она составит 250-300 Втч / кг.) Стоимость производства ячеек NMC в настоящее время составляет 12 -19% выше, чем NCA [9,11]. В ближайшем будущем интеллектуальные BMS, разработанные ведущими компаниями, специально для элементов NCA и NMC, будут способствовать формированию аккумуляторных батарей EV мощностью более 100 кВт-ч и удельной энергией более 350 Вт-ч / кг с высоким качеством и высокой безопасностью.

## **Список литературы:**

1. [www.ev-power.eu/.../WB-LYP100AH-A-LiFeYPO4-3-2V100Ah.html](http://www.ev-power.eu/.../WB-LYP100AH-A-LiFeYPO4-3-2V100Ah.html).
2. <https://batteryservice.bg/kategoria/baterii/li-ionbaterii/visokorazryadni-li-ion-baterii/>.
3. <https://www.liontecshop.com/shop/18650>.
4. H.Popp, J.Attia, F. Delcorso, A.Trifonova, Lifetime analysis of four different lithium ion batteries for (plug-in) electric vehicle, Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment, Paris , France, 2014-4-14 to 2014-4-17(2014).
5. [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_io](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_io)

6. <https://electrotransport.ru/ussr/index.php?board=48.0>
7. Meng Wang, Anh Le, Daniel J Noelle and other, Effects of electrode pattern on thermal runaway of lithium-ion battery, International Journal of Damage Mechanics 0(0) 1-8, DOI:10.1177/1056789516660176 (2016).
8. Zhu Wei, A Smart BMS for Large Format Lithium Ion Cells , utdr .utoledo. edu/cgi/ viewcontent .cgi? article...dissertations, (2011).
9. M. Brand, S. Glaser and other, Electrical safety of commercial Li-ion cells based on NMC and NCA technology compared to LFP technology/ World Electric Vehicle Symposium EVS27(2013).
10. Doerffel, Dennis (2007) Testing and characterisation of large high-energy lithium-ion batteries for electric and hybrid electric vehicles. University of Southampton, School of Engineering Sciences, Doctoral Thesis, (2007) .
11. G. Hawley, <https://evannex.com /blogs/news/ understandingteslas-lithium-ion-batteries> (2017).
12. C.Arcus ,<https://cleantechnica.com/2018/03/04/excitingdevelopments-nmc-811-lithium-battery-technology> (2018).