АКТИВНАЯ БАЛАНСИРОВКА ЛИТИЙ-ТИТАНАТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

ACTIVE BALANCING OF LITHIUM-TITANATE BATTERIES

УДК 621.355.9

Шкурат Петр Борисович, магистрант, Московский политехнический университет, г. Москва

Shkurat Peter Borisovich, Graduate Student, Moscow Polytechnic University, Moscow, e-mail: Petyan2912@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются методы балансировки для литий-титанатных аккумуляторов, их характеристики и характеристики данного материала. Показаны стандарты для LTO, приведена сравнительные характеристики аккумуляторных батарей с различным химическим составом. Были приведены некоторые топологии активной балансировки с их достоинствами и недостатками. А также была продемонстрирована структурная модель системы балансировки АКБ, которая была смоделированная в MATLAB.

Annotation

The article discusses the balancing methods for lithium-titanate batteries, their characteristics and the characteristics of this material. The standards for LTO are demonstrated, and the comparative characteristics of batteries with different chemical compositions are given. Some active balancing topologies with their advantages and disadvantages were given. The structural model of the battery balancing system, which was modeled in MATLAB, was also demonstrated.

Ключевые слова: Активная балансировка, литий-титанитовый аккумулятор, стандарты LTO, MATLAB.
Keywords: Active balancing, lithium-titanite battery, LTO standards, MATLAB.

Всем известно, что аккумуляторы широко используются в мехатронике, робототехнике, системах автоматического управления и в промышленности в целом. Электромобили, автономные роботы, системы резервного питания, мобильная связь и компьютеры — это далеко не полный список вариантов их использования. Сами аккумуляторы тоже дорабатываются. В своих разработках мы в большинстве случаев используем литий-ионные аккумуляторы, одной из разновидностей которых являются и литий-титановые аккумуляторы.

Конструктивные особенности аккумуляторов (в частности, химические процессы, протекающие в них) диктуют необходимость использования различных зарядных устройств и устройств контроля состояния аккумуляторов. Важнейшее место здесь занимает система контроля и управления аккумуляторной батареей (далее - СКУ АКБ, в зарубежной литературе используется аббревиатура BMS - Battery management syste).

Использование систем контроля и управления АКБ позволяет нам повысить производительность аккумулятора путем сбора и анализа полезной информации о состоянии аккумуляторов (текущая емкость, количество циклов заряда / разряда, текущие токи нагрузки и т. д.), внедрить наиболее эффективные методы зарядки, а также повысить безопасность батарей.

Во время работы литий-титановых аккумуляторов возникает такое явление, как разбалансировка. Это связано с тем, что все батареи имеют различия в характеристиках, таких как ток саморазряда в режиме хранения, внутреннее сопротивление, скорость разрушения электродных материалов и т. д. Соответственно, различия в напряжениях батарей приводят к сокращению срока службы батарей и выходу из строя. Чтобы решить эту проблему, люди придумали системы балансировки батарей.

При изготовлении аккумуляторов выбираются аккумуляторы с очень близкими (до 1–3%) значениями емкости и других характеристик, но предсказать, как изменятся характеристики аккумулятора при его старении и истощении ресурса, практически невозможно. Кроме того, эксплуатация АКБ в критических режимах или близких к таковым отрицательно влияет на характеристики АКБ, но степень влияния для разных АКБ может быть разной. Эти обстоятельства приводят к тому, что при зарядке / разряде аккумулятора элементы могут содержать разное количество заряда [2]. Это приводит к возникновению следующих проблем.

В первую очередь, при разряде аккумулятора, когда напряжение на каком-либо элементе достигает минимально допустимого значения, возникает необходимость отключить его, а, следовательно, и весь ЛТАКБ от нагрузки, так как дальнейший процесс разряда приведет к нарушению работоспособности. требования к режиму для этой ячейки. При наличии значительного разброса напряжения между ячейками возникает ситуация, когда в условно разряженной батарее остается часть энергии, которую невозможно использовать. Во-вторых, мы видим аналогичную ситуацию, когда аккумулятор заряжен. Если одна из ячеек достигает предельного напряжения, необходимо также отключить аккумулятор от источника питания, чтобы предотвратить повреждение этой ячейки.

В связи с этим, неизбежно разработчик аккумулятора сталкивается с проблемой разброса значений напряжений его элементов/ячеек. Для решения этой проблемы используются системы балансировки аккумуляторов, основная задача которых - минимизировать разброс напряжения между ячейками. Это позволяет полностью использовать энергоемкость аккумулятора.

Уже в скором времени многие производители будут отказываться от литий-ионных аккумуляторов в пользу других его аналогов. Одним из таких аналогово являются литий-титановый батареи. Так что же это такое? Литий-титановые (титанатные) батареи (LTO) — это тип литий-ионных батарей. Они выделяются в отдельную группу, поскольку их положительный электрод, анод,

изготовлен из специального сплава - титаната лития (Li4Ti5O12). Материал имеет некристаллическую структуру, увеличивающую поверхность контакта с электролитом: один грамм имеет площадь 100 $м^2$ / г, что выгодно отличается от углерода с 3 $м^2$ / г. Новое вещество обеспечивает высокую плотность тока. Это наиболее важный параметр для источника питания [3].

Достоинства и недостатки LTO

Новые пути развития технологии стали искать в связи с несовершенством имеющихся свинцовых, литий-железо-фосфатных и литий-ионных аккумуляторов. Они недостаточно безопасны, недолговечны и способны полноценно работать в узком температурном диапазоне.

Проведены исследования соединений лития и титана. Титанат был назван наиболее многообещающим веществом [3].

Прямым следствием электрохимической и механической устойчивости структуры материала являются показатели пожаро- и взрывобезопасности, которые значительно ниже, чем у литий-ионных элементов [5].

Еще одно преимущество связано со способностью конденсаторов с электродами Li4Ti5O12 работать в широком диапазоне температур от -40 до +55 ˚С без потери работоспособности.

Эффективность заряда-разряда колеблется пропорционально силе тока и составляет от 85 до 95 %. После 10 тысяч циклов эффективность падает до 90, а после 20 - до 80 %.

Из недостатков стоит отметить низкое напряжение и относительно невысокую распространенность данной технологии и незначительные объемы производства.

Первая проблема решается добавлением активных элементов, и это несерьезно с учетом их меньшего веса по сравнению с литий-ионными. Но более существенно второе обстоятельство: литий-титанатные батареи по-прежнему дороже других типов батарей [3].

Характеристики материала:

- обеспечивает высокую удельную емкость аккумуляторов до 60%;

- предельный ток заряда 10С, при котором аккумулятор заряжается до 80% за 5 минут, а лучшие модели за 1 минуту;
- недорогой и прочный;
- электроды на его основе значительно сокращают время зарядки;
- обладает высокой ионной и электронной проводимостью.

Характеристики соответствующих аккумуляторов очень высокие. Таким образом, количество циклов заряда-разряда превышает 10 000. Емкость со временем немного снижается: на 20% - при токе разряда 0,5С после 10 миллионов циклов и при токе разряда 3С после 10 000.

Стандарты LTO

Российские и зарубежные производители следуют одинаковым стандартам [3]:

- номинальное напряжение - от нижнего предела 2 В до 2,4 В (обычно 2,3 В);
- предельное напряжение разряда - от 1,5 В до 1,7 В;
- удельная мощность при максимальной нагрузке - от 3000 до 5000 Вт / кг;
- энергопотребление - от 30 до 110 Вт / кг;
- малое внутреннее сопротивление;
- плотность заряда - до 115 Вт * ч / л.

Все известные сегодня источники тока в виде свинцово-кислотных, щелочных аккумуляторов, промышленного применения, больше не выдерживают никаких сравнений с литий-ионными аккумуляторами. Но даже в современных системах энергосбережения литий-титанатные батареи выделяются своими уникальными качествами [1]. Ниже представлена сравнительная таблица свойств аккумуляторных батарей различных систем:

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика АКБ [5]

Система АКБ	Свинцовокислотные с панцирным катодом	Li-ion, традиционные Катод - $UFeP0_4/LiMn_20_4$ и др. Анод -С	n LiTiO Катод - $LiFeP0_4$,$LiMn_20_4$ и др. Анод - наночастицы $Li_4Ti_50_{12}$
Количество циклов при разряде на 80 % (С-это емкость аккумулятора)			
Ток нагрузки 0.5 С	1000	2500	29 000
Ток нагрузки 1С	500	1000	22 000
Ток нагрузки 2 С	100	500	16 000
Ток нагрузки 5 С	50	300	8 000
Ток нагрузки 10 С	0	0	5 000
Количество циклов при разряде на 3-4 %			
Ток нагрузки 0.5 С	30 000	200 000	10 000 000
Остаточная емкость при температуре минус 40 С° и токе нагрузки 2 С	0.5 %	0.5 %	80%
Заряд аккумулятора при температуре	ниже -40 С° возможен	ниже -5 С° не возможен	ниже -40 С° возможен
Максимальный ток заряда	0,2 С	2 С	10С
Доля использования данных аккумуляторов в SMART GRID США в 2009-2010 году	0%	80%	30%
Доля использования данных аккумуляторов в энергосистемах США в 2011 году	0%	30%	50%

Емкостная балансировка

Емкостная балансировка – это метод балансировки, при котором энергия передается от одной ячейки к другой через буферный конденсатор. Емкостная балансировка с одним буферным резервуаром включает передачу энергии непосредственно от одной ячейки к другой внутри модуля (рис. 1.6). Сначала контроллер подключает наиболее заряженную ячейку к буферному конденсатору путем включения соответствующих переключателей. Энергия накапливается в конденсаторе (стоит отметить, что к конденсатору может быть подключена от одной ячейки до всей батареи). Затем наименее заряженная ячейка подключается и получает энергию от конденсатора. Преимущества такой системы - ее простота и возможность передавать энергию непосредственно самой слабой ячейке. Один из недостатков метода - требуется сложный

контроллер с быстрым переключением, и возможность работы всего с одним конденсатором, что значительно снижает скорость балансировки [4].

Балансировка с коммутационными мощностями заключается в том, что энергия сначала перекачивается в буферную емкость из i-ячейки, а затем передается из буферной емкости в соседнюю (i + 1) -ячейку. Отсюда следует главный недостаток такой системы - передача заряда от удаленных друг от друга ячеек чрезвычайно затруднена.

Общим недостатком емкостных систем балансировки являются скачки тока при переключении между ячейками, которые могут привести к выходу из строя ключей [4].

Дроссельная балансировка

При балансировке дросселем, элементом для передачи энергии является дроссель (индуктор или трансформатор). Системы на индукторах аналогичны емкостным [4].

Системы дроссельной балансировки лишены недостатка, свойственного емкостным системам, - пускового тока при переключении между ячейками. В то же время основным недостатком систем, построенных на индукторах, является скачок напряжения на транзисторах, когда возникает зазор между соседними ячейками. Это может привести к перегоранию транзисторов. Например, есть 100 ячеек на 3,6 вольт. Между двумя ячейками образовался зазор - в результате все 360 В будут проходить через два транзисторных ключа. Сопротивление открытого канала транзисторов около 0,2 Ом, а сопротивление катушки индуктивности 0,3 Ом - тогда через транзисторы будет протекать ток 720А, который моментально сожжет транзисторы [4].

Одним из наиболее эффективных методов, основанных на балансировке дроссельной заслонки, является технология PowerPump, запатентованная Texas Instruments (американская компания, один из крупнейших производителей полупроводниковых элементов, микросхем, электроники и изделий на их основе). При этом методе балансировки в специализированной микросхеме используется индуктивный преобразователь для передачи мощности, а также

полевой МОП-транзистор с каналом n и p и индуктор, расположенный между парой батарей.

Преобразователи для активной балансировки

Наиболее эффективными топологиями считаются системы активной балансировки, основанные на использовании преобразователей - повышающего, понижающего, прямоходового и обратноходового, а также двунаправленного. В таких системах ключи располагаются со стороны вторичной обмотки трансформатора (со стороны аккумулятора), то есть на ключи действует только напряжение ячеек, что не приведет к их перегоранию. При этом усилители располагаются со стороны первичной обмотки трансформатора (то есть со стороны, к которой подключено зарядное устройство). Такой подход сводит к минимуму потери в переключателях и в то же время подбирает разные уровни напряжения на обеих сторонах трансформатора.

В частности, системы повышающих преобразователей передают энергию от одной ячейки к целой группе ячеек. Такая система приведена, например, на рисунке 1. Контроллер находит самую заряженную ячейку, производит включение соответствующего преобразователя, и энергия от ячейки начинает распределение по всей группе.

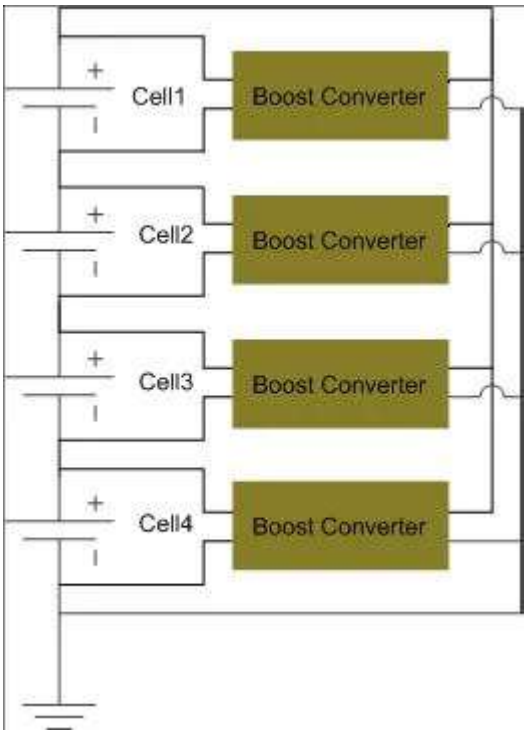


Рисунок 1 – Система балансировки на повышающих преобразователях

Общей особенностью обратноходовых преобразователей и buck-boost повышающих преобразователей является то, что они накапливают энергию непосредственно в катушке индуктивности. Напротив, прямой преобразователь передает энергию только через трансформатор, а для хранения энергии используются дополнительные элементы - индукторы. Сама энергия напрямую передается от первичной обмотки зарядного устройства.

Основываясь на технических характеристиках ЛТАКБ и требованиях, предъявляемых к проектируемой системе, планируется реализовать систему контроля и управления зарядом, причем система балансировки (СБ) – это система с активным управлением, построенная на DC-DC преобразователях. Исходя из того, что балансировку следует проводить во всех режимах работы, предлагается использовать второй вариант схемы - перераспределение полного тока по проседающим ячейкам. Система управления собирает данные о напряжениях ячеек и формирует управляющие сигналы для балансировочного устройства.

Блок-схема системы представлена на рисунке 1.2.

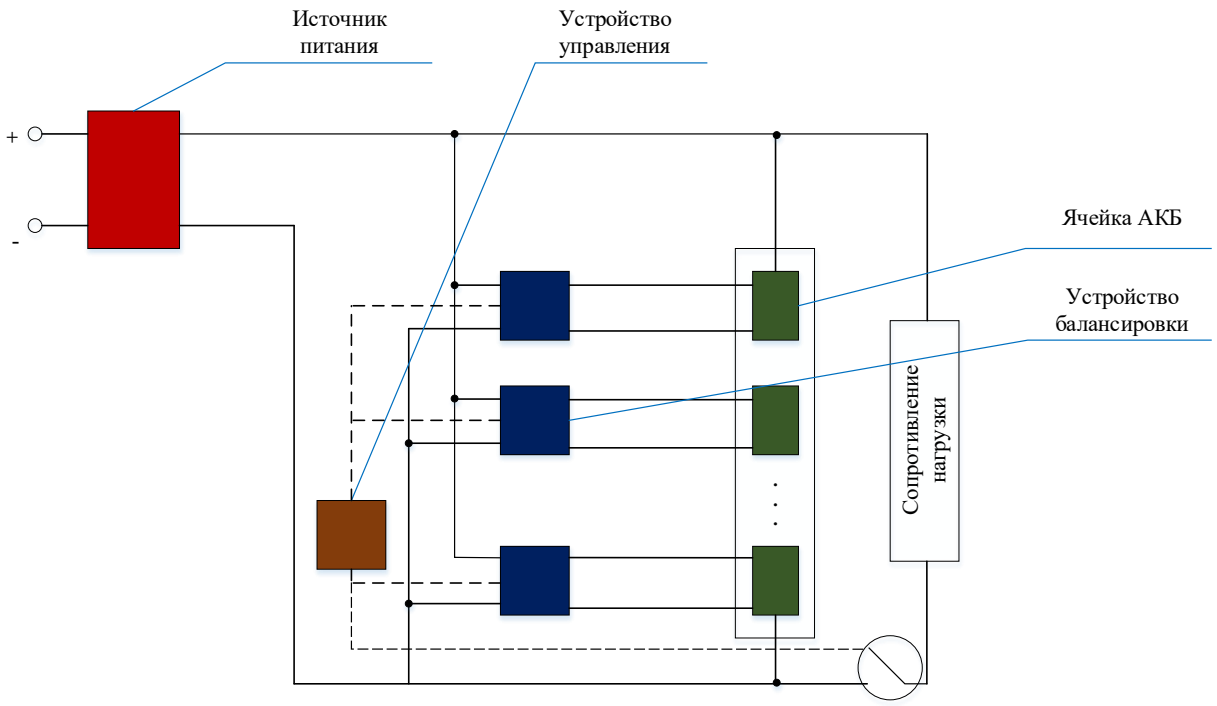


Рисунок 1.2 – Структурная блок-схема системы балансировки

Структурная модель системы балансировки АКБ

Для анализа работы устройства балансировки на повышающих DC/DC преобразователях была разработана модель этого устройства (рис.1.3) в программе Matlab/Simulink и произведено его моделирование с ЛТАКБ батареей, состоящей из четырех аккумуляторов емкостью 5.4 А·ч.

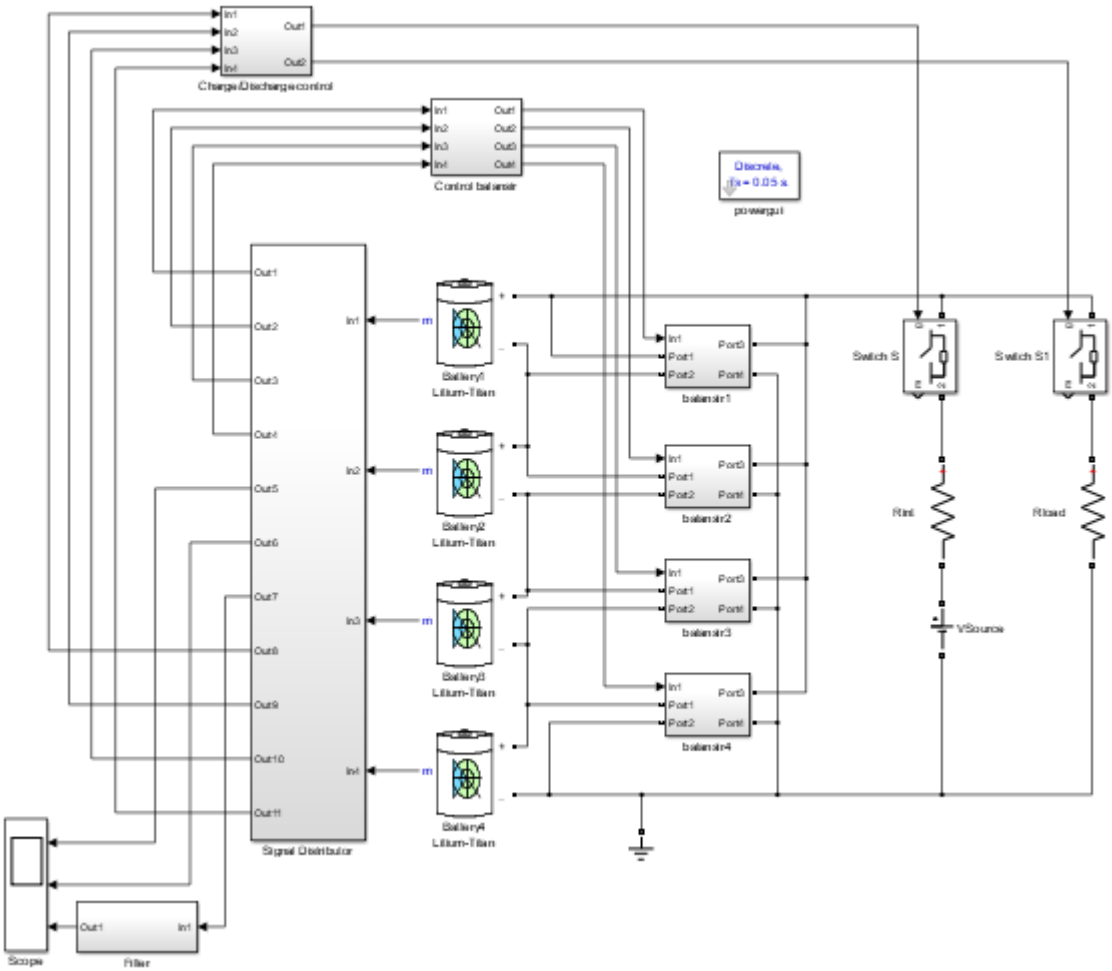


Рисунок 1.3 – Структурная модель системы балансировки на повышающих DC/DC преобразователях

Цепь разряда и заряда батареи

Разряд батареи в разработанной модели осуществляется при подключении к батарее нагрузки Rload посредством открытия силового ключа SwitchL (рис. 1.3). Для того, чтобы аккумулятор разряжался током 10 А, значение сопротивления Rload определим по формуле:

$$R_{load} = \frac{U_{\text{ср.разр}} \cdot n}{I_{\text{разр}}} = \frac{1.9 \cdot 4}{10} = 0.76 \text{ Ом}$$

где, Ucp = 1.9 [В] – среднее напряжение ЛТАКБ аккумулятора под нагрузкой током Iразр = 10 А, n – количество аккумуляторов в батарее. Заряд батареи осуществляется при подключении к ней источника напряжения VSource (20 В) с внутренним сопротивлением Rint посредством открытия силового ключа SwitchS. Значение сопротивления Rint, которое следует установить в модели, приблизительно можно определить по формуле:

$$R_{int} = \frac{U_{source} - U_{\text{ср.зар}} \cdot n}{I_{\text{зар}}} = \frac{20 - 1.9 \cdot 4}{10} = 1.24 \text{ Ом}$$

где, Ucp_зар = 1.9 [В] – среднее напряжение заряда ЛТАКБ элемента током Iзар = 10 А. Значения сопротивлений всех силовых ключей на схеме модели в открытом состоянии выбраны одинаковыми и равными 1 мОм, как у лучших современных MOSFET.

1. Использование устройства балансировки существенно снижает степень разбаланса, следовательно, дает возможность в полной мере использовать аккумуляторной батареи, длительность разряда сбалансированной АКБ всегда больше, чем у несбалансированной.

2. Длительность заряда АКБ при использовании устройств балансировки существенно увеличивается. В связи с этим балансировку желательно выполнять не каждый цикл заряда/разряда, а только при необходимости.

3. Выполнять балансировку АКБ наиболее эффективно на конечном этапе заряда и разряда, когда разность напряжений элементов АКБ увеличивается.

Литература

1. Об аккумуляторах, батарейках: их отличия и особенности, URL:https://ecoteco.ru/library/magazine/zhurnal-8/tehnologii/ob-akkumulyatorah-batareykah-ih-otlichiya-i-osobennosti
2. Алексей Рыкованов. Силовая электроника, № 1'2009 " Системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей, с. 52-55.

3. Литий-титанатные аккумуляторы – современно, удобно и долговечно, URL:https://3batareiki.ru/akkumulyatory/litij-titanatnye-akkumulyatory
4. Активная балансировка Li-ion аккумуляторов, URL: https://kravt-studio.com/blog/balansirovka-liion
5. Литий-ионные аккумуляторы системы LMO - Li4Ti5O12 (литий-титанат), URL: http://akb-energy.ru/rus/produkti/litii-ionnie-akkumulyatori-sistemi-lifepo4--li4ti5o12-litii-titanat

Literature

1. About accumulators, batteries: their differences and features, URL:https://ecoteco.ru/library/magazine/zhurnal-8/tehnologii/ob-akkumulyatorah-batareykah-ih-otlichiya-i-osobennosti
2. Alexey Rykovanov. Power electronics, No. 1'2009 "Balance systems for Li-ion rechargeable batteries, pp. 52-55.
3. Lithium-titanate batteries - modern, convenient and durable, URL:https://3batareiki.ru/akkumulyatory/litij-titanatnye-akkumulyatory
4. Active balancing of Li-ion batteries, URL: https://kravt-studio.com/blog/balansirovka-liion
5. Lithium-ion batteries of the LMO system - Li4Ti5O12 (lithium titanate), URL: http://akb-energy.ru/rus/produkti/litii-ionnie-akkumulyatori-sistemi-lifepo4--li4ti5o12-litii-titanat