

УДК621.355:629.331

А.В. Кочеров, Д.Р. Курмакаев, А.Ю. Сизов, А.А. Туманов, Л.О. Федосова
ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АККУМУЛЯТОРА
ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ LCV-СЕКМЕНТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Посвящена вопросам проектирования аккумуляторной системы отечественного электромобиля сегмента LCV. В частности, рассматривается базовый вопрос выбора типа химии аккумуляторной ячейки таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение требований к эксплуатационным характеристикам электромобиля. Проведен анализ существующих химических источников тока, в том числе наиболее широко применяемых в электротранспорте. Сделан вывод о предпочтительном типе химии для LCV-электромобиля.

Ключевые слова: аккумуляторная система, электрохимическая система, электромобиль, система термостатирования, LightCommercialVehicle, литий-ионный аккумулятор, аккумуляторная ячейка.

Грузоперевозки по территории нашей страны играют важную роль для обеспечения связи между различными субъектами, обусловленную значительной протяженностью по площади и рассредоточением населенных пунктов. Число компаний, осуществляющих процесс грузоперевозок, растет изо дня в день, что свидетельствует о повышенном спросе на этот вид услуг [3].

При этом увеличивается не только межрегиональный грузопоток, но и внутри городов из-за роста интенсивности хозяйственной и промышленной деятельности компаний на их территории. Как правило, для обеспечения грузоперевозок в городских условиях используются не крупные грузовики, а автомобили сегмента LCV – LightCommercialVehicle (легкий коммерческий автомобиль), поскольку они более маневренные, экономичные и, соответственно, более выгодные в плане себестоимости перевозок.

Современные тенденции в автомобильной отрасли к производству электромобилей, привлекательность их эксплуатации в городских условиях, а также динамичное развитие рынка автомобилей LCV-сегмента побуждают автопроизводителей к разработке LCV-электроплатформ. Разработками в данной отрасли занимаются такие мировые автогиганты, как Mercedes, Renault и Volkswagen.

Как известно, наиболее важными компонентами любого электромобиля являются электропривод и аккумуляторная система [4]. Расчет и конструирование электропривода – одна из наиболее важных проектных задач в машиностроении в целом, поэтому к решению данной задачи существует большое количество подходов и методов, ориентированных на обеспечение различных выходных характеристик [7].

Иначе обстоит дело с проектированием другого, не менее важного, компонента электромобиля – аккумуляторной системы. Поскольку отрасль электрического автомобилестроения является относительно молодой, то на настоящий момент не существует устоявшихся концепций и методик, которые позволили бы в достаточной мере определенно решать задачи проектирования аккумуляторных систем. По этой причине каждый автопроизводитель, занимающийся выпуском или проектированием собственных электроплатформ, решает задачи проектирования аккумуляторных систем по-своему, разрабатывая собственную методику и получая уникальный продукт.

В 2017 году ОАО «Группа «ГАЗ» занялась разработкой собственного электромобиля на базе автомобиля «Газель-NEXT». В состав проектных работ, в том числе, входит разработка бортовой аккумуляторной системы, в которой принимает участие коллектив студенческого конструкторского бюро «Мехатроника и робототехника» НГТУ им. Р.Е.Алексеева. Данная статья посвящена вопросам проектирования химического состава аккумуляторной системы для электромобиля на базе «Газель-NEXT».

Аккумулятор представляет собой химический источник тока (ХИТ), т.е. такой источник ЭДС, в котором электрическая энергия появляется за счет преобразования энергии химической реакции элементов, входящих в состав ХИТ [2]. Поскольку концепция электромобиля подразумевает повторную зарядку (или подзарядку) источников энергии, то элементы питания должны представлять собой вторичные ХИТ, т.е. перезаряжаемые от внешнего источника тока [6].

Любой аккумулятор можно охарактеризовать рядом параметров:

1. Тип химии аккумулятора.
2. Номинальная емкость аккумулятора. Измеряется в Ампер-часах и определяет количество энергии, запасаемой аккумулятором.
3. Внутреннее сопротивление аккумулятора. Измеряется в миллиОмах. Этот параметр отражает способность аккумулятора отдавать ток в нагрузку. Чем меньше внутреннее сопротивление, тем больший ток может обеспечить аккумулятор.
4. Саморазряд аккумулятора. Выражается в процентах от номинальной емкости. Этот параметр характеризует самопроизвольный разряд аккумулятора, отключенного от нагрузки.
5. Плотность энергии. Измеряется в Ватт-часах на килограмм ($Вт \cdot ч/кг$). Чем выше этот показатель, тем легче будет аккумулятор заданной емкости.
6. Ресурс (время жизни). Выражается в количестве циклов заряд/разряд и показывает, сколько циклов заряд/разряд сможет обеспечить аккумулятор до того момента, пока его емкость не снизится до определенного значения (как правило, 80%).

Приведенные параметры являются зачастую взаимосвязанными. В частности, номинальная емкость определяется исходя из объемно-габаритных параметров и удельных характеристик аккумулятора. Удельные, а также зарядно-разрядные и ресурсные характеристики, в свою очередь, определяются типом химии и технологией аккумулятора.

В современной технике используются пять основных типов аккумуляторов, отличающихся по своему химическому составу [2]:

1. Никель-кадмиевые (NiCd). Хорошо отработанная и изученная технология, но обладает низкой плотностью энергии. Используется там, где важны долговечность, способность обеспечить высокий ток нагрузки и малая стоимость. Основные области применения: портативные радиостанции, медицинское оборудование, профессиональные видеокамеры и электроинструмент. NiCd аккумуляторы содержат токсичные материалы и являются экологически грязными.
2. Никель-металлогидридные (NiMH). По сравнению с NiCd имеют более высокую плотность энергии, но меньшее время жизни. NiMH не содержат токсичных материалов. Применяются в мобильных телефонах и портативных компьютерах.
3. Литий-ионные (Li-ion). Наиболее бурно развивающаяся технология. Используются там, где нужна высокая плотность энергии и малый вес. Li-ion дороже всех других аккумуляторов. При эксплуатации необходимо строго соблюдать режимы заряда и разряда, указанные производителем из соображений безопасности. Применяются в компьютерах и сотовых телефонах.
4. Литий-полимерные (Li-polymer). Задуманы как удешевленная версия Li-ion аккумуляторов. Этот тип химии по плотности энергии аналогичен Li-ion. Это позволяет делать Li-polymer аккумуляторы очень компактными. В основном, используются в мобильных телефонах.
5. Герметичные свинцово-кислотные (SLA). Применяются там, где требуется большая мощность, а вес не имеет значения. Типовые области применения - стационарное медицинское оборудование, электромобили, системы аварийного энергоснабжения, UPS.

Литий-ионные аккумуляторы являются наиболее подходящими в качестве ХИТ для электромобиля [5]. Электромобили с литий-ионными аккумуляторами могут иметь пробег без подзарядки 200 км и более. В настоящее время несколько фирм Японии, Франции, США и других стран проводят испытания электромобилей с литий-ионными аккумуляторами. Ос-

новным недостатком литий-ионных аккумуляторов, ограничивающим их применение в электромобилях, является очень высокая стоимость. Однако стоимость аккумуляторов непрерывно снижается благодаря использованию более дешевых материалов, усовершенствованию технологии и увеличению объема производства.

Разные подвиды литий-ионной электрохимической системы именуется по типу своего активного вещества и обозначаются либо его химической формулой, либо словесно[5]. Далее представлены типы химии литий-ионных аккумуляторов, применяемых в электро-транспорте[1].

Литий-марганцевые ячейки

Структура литий-марганцевой ячейки (LMO) содержит трехмерную марганцевую шпинель в качестве катода, за счет чего улучшается поток ионов на электроде и уменьшается внутреннее сопротивление ячейки. Также такая шпинель обладает высокой термостабильностью, но срок жизни и количество циклов ячеек ограничены.

За счет низкого внутреннего сопротивления ячейки обеспечиваются быстрый заряд и высокое значение силы тока разряда: цилиндрические ячейки форм-фактора 18650 способны разряжаться силой тока в 20-30А с умеренным теплообразованием. Кроме того, литий-марганцевые ячейки способны выдерживать импульсные броски тока до 50А в течение 1-2 с. Продолжительная нагрузка в 50А приведет к нагреву аккумулятора, температура которого не должна превышать 80°C во избежание деградации. Высокая выходная мощность и хорошие показатели термостабильности под нагрузкой позволяют использовать литий-марганцевые ячейки в аккумуляторах мощных инструментов, медицинского оборудования, а также данные ячейки используются в аккумуляторах гибридного и электротранспорта.

Емкость литий-марганцевого аккумулятора примерно на треть ниже, чем у литий-кобальтового. Однако конструкция шпинели позволяет оптимизировать ячейку под различные задачи, изменяя емкость. В частности, емкость ячейки форм-фактора 18650 составляет всего 1100 мАч, в то время как оптимизированной ячейки того же форм-фактора – 1500 мАч.

Большинство литий-марганцевых ячеек комбинируются с литий-никель-марганец-кобальтовыми (NMC) для повышения удельной энергоемкости и продления срока службы. Подобная комбинация используется в большинстве электромобилей, таких как NissanLeaf, ChevyVolt и BMW i3. Доля литий-марганцевых ячеек в таких аккумуляторах составляет около 30% и обеспечивает высокие возможности ускорения двигателя, а NMC-часть отвечает за размер автономного пробега.

Литий-никель-марганец-кобальт-оксидные ячейки

Одним из наиболее успешных вариантов исполнения литий-ионной электрохимической системы является сочетание никеля, марганца и кобальта (NMC) в катоде. По аналогии с LMO, эти системы могут быть оптимизированы под емкость или мощность. Например, NMC-ячейка форм-фактора 18650 для умеренной нагрузки имеет емкость 2800 мАч и может обеспечивать силу тока в 4-5 А, а версия в том же форм-факторе, но оптимизированная под мощностные показатели, имеет емкость только 2000 мАч при максимальной силе тока разряда в 20 А. Показатель емкости может быть увеличен до 4000 мАч при добавлении кремния в состав анода, однако при этом значительно ухудшатся нагрузочные характеристики и долговечность ячейки. Это объясняется свойствами кремния изменять свои размеры при зарядке и разрядке, что приводит к механической неустойчивости конструкции аккумулятора.

Основной элемент управления характеристиками в технологии NMC – это сочетание никеля и марганца. Похожим примером является поваренная соль, компоненты которой – натрий и хлор – по отдельности являются токсичными, но в соединении образуют полезное пищевое вещество. Никель характеризуется высокой удельной энергоемкостью, но низкой стабильностью; марганец имеет преимущество в виде шпинельной структуры, которая обес-

печивает низкое внутреннее сопротивление, но приводит к недостатку – малой удельной энергоемкости. Сочетания данных металлов в различных пропорциях позволяют компенсировать недостатки друг друга и в полной мере использовать их сильные стороны.

NMC-аккумуляторы используются для мощных инструментов, электровелосипедов и других силовых агрегатов. Состав катода, как правило, сочетает никель, марганец и кобальт в равных частях. Такое соотношение известно как 1-1-1. Оно выгодно стоимостью, так как содержание дорогого кобальта по сравнению с другими версиями ячеек относительно невелико (третья часть объема катода). Еще одна успешная комбинация NMC содержит 5 частей никеля, 3 части кобальта и 2 части марганца.

Высокая производительность и низкая стоимость данных ячеек делают их наиболее популярными. Производство катода из никеля, марганца и кобальта технологически несложно, что позволяет удовлетворить широкий спектр требований электротранспорта и подобрать оптимальные сочетания металлов катода для обеспечения циклической работы и приемлемых нагрузочных характеристик. Кроме того, низкий уровень самонагрева делает эту батарею предпочтительным вариантом для электротранспорта.

Литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные ячейки

Ячейки типа NCA схожи с NMC-ячейками. Они выделяются высокой удельной энергоемкостью, удельной мощностью и длительным сроком службы. Электрохимическая система NCA стала очередным этапом развития литий-никелевой системы в направлении повышения стабильности.

Высокие показатели энергоемкости и плотности энергии данных ячеек вкупе с их долговечностью делают такую технологию перспективной для электротранспорта. Но основными недостатками NCA-ячеек на настоящий момент являются низкая безопасность и высокая стоимость, поэтому на данном этапе их использование в качестве источника энергии для электромобилей крайне затруднительно.

Литий-титанатные ячейки

Анод литий-титанатной ячейки (Li4Ti5O12) состоит не из графита, как в классическом литий-ионном аккумуляторе, а из нанокристаллов титаната лития. Графит также присутствует в составе ячейки, но в роли катода. Номинальное напряжение ячейки составляет 2,4В, благодаря чему возможен быстрый заряд аккумулятора, а также обеспечивается высокий ток разряда – 10С. Количество циклов заряда-разряда больше, чем у обычной литий-ионной ячейки. Литий-титанатные ячейки безопасны, имеют отличные низкотемпературные характеристики: при -30°C емкость сохраняется на 80%. Но стоимость таких ячеек значительно выше, а показатель удельной энергоемкости в 65 Вт*ч/кг позволяет конкурировать только с никель-кадмиевыми аккумуляторами. Типичные области применения данных аккумуляторов – электрические силовые агрегаты, системы аккумулирования электроэнергии и уличное освещение на солнечных батареях, однако в настоящее время ведутся активные разработки литий-титанатных аккумуляторов для электрических грузовиков и автобусов.

Основные требования к эксплуатационным характеристикам электромобилей LCV-сегмента заключаются в обеспечении достаточной грузоподъемности и запаса автономного хода на одном заряде автомобиля. При этом требования к грузоподъемности здесь значительно серьезнее, чем для легковых автомобилей, в силу выполняемых задач. Кроме того, поскольку коммерческий транспорт, как правило, эксплуатируется в практически непрерывном режиме, важным параметром является количество зарядно-разрядных циклов аккумулятора. В табл. 1 приведены основные требования, предъявляемые к проектируемому электромобилю.

Таблица 1

Основные технические параметры проектируемого LCV -электромобиля

Технические характеристики	Параметры разрабатываемого электромобиля LCV - сегмента
Полная масса	3500-4500 кг
Грузоподъемность	1400-1600 кг
Мощность номинальная/ максимальная тягового электродвигателя	80-120 кВт
Момент номинальный/максимальный	300-450 Нм
Максимальная скорость,	100-130 км/ч
Емкость аккумуляторных батарей	50-70 кВтч
Пробег на одной зарядке	120-200 км
Время 100% зарядки, ч	Не более 7 часов при зарядке от розетки 220 В, 0,75-1 час при использовании специального зарядного устройства

Таким образом, исходя из предъявляемых требований и характеристик различных типов химии ХИТ, можно сделать вывод, что литий-ионные батареи являются наиболее подходящим на текущий момент типом ХИТ для электромобиля, поскольку их удельные эксплуатационные параметры и показатели безопасности значительно выше, чем у аналогов, основанных на иных электрохимических системах.

Наибольший интерес представляет совместное использование в определенных пропорциях в составе аккумулятора электромобиля NMC и LMO-ячеек, поскольку подобная комбинация позволяет обеспечивать наилучшие соотношения эксплуатационных характеристик LCV-электромобиля.

Перспективно применение систем NCA и LTO в силу их более высоких удельных (NCA) и эксплуатационных (LTO) характеристик. Однако масштабный ввод в эксплуатацию данных систем на текущем этапе невозможен в силу ряда проблем, связанных с несбалансированностью характеристик ячеек, а также высокой стоимостью и сложностью их производства.

Исследования в области проектирования аккумуляторов разделяются на два основных направления. Первое заключается в оптимизации существующих электрохимических систем по критериям максимизации срока службы, удельных характеристик и емкости ячейки, а также в совершенствовании технологий их производства с целью его удешевления. В первую очередь это относится к NMC, NMA, LMO, LTO-ячейкам.

Второе направление ориентировано на разработку новых электрохимических систем, позволяющих достигать качественно иного уровня эксплуатационных характеристик и параметров аккумуляторов. В частности, речь идет о разработках твердотельных литиевых аккумуляторов, литий-серных ячеек. Также проводятся исследования в области разработки эффективных систем обслуживания аккумуляторов (систем термостатирования, балансировки, оптимизации зарядных операций и пр.).

Библиографический список

1. **Абрамова, О.** Типы и виды литий-ионных (литиевых) аккумуляторов (Li-ion) [Электронный ресурс] // URL: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-205> (дата обращения 20.12.2017 г.).
2. **Бадаев, Ф.З.** Элементы электрохимии. Химические источники тока: учеб. пособие / Ф.З. Бадаев, В.А.Батюк, В.Н. Горячева. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 71 с.
3. **Белозерцева, Н.П.** Структура и особенности современного рынка грузоперевозок / Н.П. Белозерцева, М.С. Ярайкина // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС.- №1/2012. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2012. – С. 64–73.
4. **Гаджилы, Б.Э.** Исследование аккумуляторных батарей электромобилей // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура (электронный научный журнал). – 2014. – №2(2). – М.: МАДИ, 2014.

5. **Кедринский, И.А.** Li-ионные аккумуляторы / И.А. Кедринский, В.Т. Яковлев. – Красноярск: «Платин», 2002. – 268 с.
6. **Таганова, А.А.** Герметичные химические источники тока: справочник / А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов. – СПб.: Химиздат, 2005. – 264 с.
7. **Шабанов, А.В., Ломакин, В.В., Шабанов, А.А.** Характеристики электромобилей и тенденции развития электропривода / А.В. Шабанов, В.В. Ломакин, А.А. Шабанов // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – №3 (86). – С. 38–43.

*Дата поступления
в редакцию 05.04.2018*

A.V. Kocherov, D.R. Kurmakaev, A.Y. Sizov, A.A. Tumanov, L.O. Fedosova

SELECTING OF THE ELECTROCHEMICAL SYSTEM TYPE FOR THE ELECTRIC LCV

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Introduction: The development of electric platforms for the segment of light commercial vehicles (LCV) has become popular at present. The most important components of any electric vehicle are the electric drive and the battery system. At the moment there are no established concepts and techniques that would sufficiently adequately solve the battery systems design problems. For this reason, each automaker engaged in the production or design of its own electrical platforms, solves the problem of designing battery systems in its own way. Therefore, the development of the first domestic battery system for electric vehicles LCV-segment is an urgent scientific and technical task.

Methods: The work methods are applied: analysis, decomposition, investigation of electrochemical processes.

Results: Analytical review of existing chemical sources of current is carried out. The requirements for electric vehicles of the LCV segment are analyzed. Investigations of the characteristics of various types of lithium-ion batteries have been conducted. A conclusion is drawn on the preferred type of chemistry of the LCV electric vehicle battery.

Conclusions: Of greatest interest is the joint use in certain proportions in the battery of the electric vehicle NMC and LMO-cells, since such a combination allows to provide the best ratio of the performance characteristics of the LCV-electric vehicle. The use of NCA and LTO systems is promising because of their higher specific (NCA) and operational (LTO) characteristics.

Key words: battery system, electrochemical system, electric car, thermal management system, Light Commercial Vehicle, lithium-ion battery, battery cell.