

УДК 625.033.34

Обзор методов контроля и диагностики систем накопления электрической энергии

Си Чжэньчао, К. В. Константинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф.

Для цитирования: Си Чжэньчао, Константинов К. В. Обзор методов контроля и диагностики систем накопления электрической энергии // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 143–154. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-143-154

Аннотация

Цель: обзор текущей ситуации и перспективных направлений развития технологии тестирования систем хранения электрической энергии на базе литийионных аккумуляторных батарей. **Методы:** используя литературный анализ, были проведены обзор и систематизация истории развития технологии контроля литийионных аккумуляторных систем и проведено сравнение преимуществ и недостатков наиболее распространенных методов определения состояния заряда (SOC). **Результаты:** литийионные аккумуляторные системы представляют собой неизбежную тенденцию в будущем электрохимического хранения энергии. Для повышения их стабильности и экономической эффективности необходимо, чтобы системы диагностики позволяли с достаточной точностью определять внутренние параметры аккумулятора и быстро диагностировать типы неисправностей. В будущем исследования в этой области будут продолжаться в направлении улучшения точности систем сбора данных и создания точных цифровых моделей аккумуляторов. **Практическая значимость:** проведены обзор и систематизация истории развития технологии контроля состояния литийионных аккумуляторных систем с целью выявления текущих проблем и перспективных направлений будущих исследований в данной области.

Ключевые слова: системы хранения электрической энергии, технология диагностики литийионных аккумуляторов, системы управления батареями, метод ампер-временного интегрирования, метод напряжения разомкнутой цепи, модель эквивалентной RC-цепи второго порядка, системы сбора данных, цифровая модель аккумулятора.

В условиях быстрого развития мировой экономики истощение ископаемых источников энергии привело к возникновению ряда серьезных проблем, охватывающих целый ряд ключевых областей, включая электроэнергетику, транспорт и экологию. Эта проблема побуждает страны мира активно разрабатывать новые энергетические технологии. Правительство Китая в 2020 году поставило двойную цель по сокращению выбросов углекислого газа: не допускать дальнейшего роста выбросов углекислого газа после достижения пика в 2030 году и достичь углеродной нейтральности к 2060 году. В соответствии с данным стратегическим направлением энергетический сектор Китая пережил значительный технологический перелом, причем электрический транспорт и системы для хранения энергии (СНЭ) получили приоритетное развитие.

В настоящее время основные технологии хранения энергии, используемые в Китае, включают прежде всего гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), электрохимические системы накопления электрической энергии (СНЭЭ), накопители на маховиках и сжатом воздухе. По состоянию на 2022 год наибольшую долю накопителей энергии в Китае традиционно составляют гидроаккумулирующие станции, на долю которых приходится 77 % систем накопления энергии. Среди новых технологий хранения энергии доминируют накопители на литийионных батареях, на долю которых приходится 93,7 % оставшегося объема, что объясняется главным образом быстрорастущим рынком электромобилей и СНЭЭ. Продажи электромобилей достигли 6 872 000 единиц, рост за год составил 96 %, а объем поставок энергетических батарей достиг 480 ГВт·ч, рост за год составил 118,2 %. В секторе хранения энергии объем поставок литийионных батарей в Китае в 2022 году достиг 130 ГВт·ч, увеличившись на 170,8 % по сравнению с предыдущим годом. Литиевый рынок переживает бум, но в то же время на первый план выходит ряд проблем, наиболее заметной из которых является безопасность СНЭЭ. В связи с этим фактом системы управления питанием (Battery management system, BMS) стали одним из ведущих направлений исследований. Согласно статистическим данным, с 2014 по 2022 год спрос на системы управления аккумуляторными батареями в Китае вырос с 81 000 до 4 845 000 комплектов, в 2022 году объем китайского рынка систем управления питанием достиг 23,53 млрд юаней, и ожидается, что в будущем он будет продолжать расти.

Системы управления батареями (BMS). Ключом к развитию технологии тестирования электрохимических накопителей энергии является система управления батареями (BMS), которая имеет решающее значение для величины мощности, безопасности и стоимости электрохимических систем хранения энергии. В настоящее время СНЭЭ имеют высокую степень интеграции, устанавливаются в ограниченном пространстве, и, как следствие, локальная плотность энергии накопителей велика. Если происходит авария, то она обычно вызывает ряд цепных реакций, которые ставят под угрозу безопасность всей системы, поэтому к достоверности обнаружения и точности выходных данных системы BMS предъявляются высокие требования. Современная BMS контролирует ток и напряжение отдельного элемента батареи, способна управлять балансом заряда и разряда элемента, наблюдать за токами и температурами в процессе заряда и разряда батареи, определяет степень заряда аккумулятора (State of charge, SOC) и степень работоспособности аккумулятора (State of health, SOH), осуществляет связь с внешней системой заряда и мониторинга в реальном времени, координирует распределение мощности аккумуляторной батареи. Это позволяет предотвратить перезаряд, переразряд, перегрев и другие неисправности; увеличить срок службы батареи и обеспечить стабильную работу СНЭЭ в целом.

Основные функции системы управления батареями показаны на рис. 1.



Рис. 1. Основные функции системы управления батареями

В настоящее время основные направления развития BMS охватывают следующие аспекты:

- оценку внутренних параметров: использование измеряемых параметров, таких как ток, температура, напряжение, и создание динамической математической модели для точной оценки неизмеряемых внутренних параметров, таких как SOC, SOH;
- выравнивание мощности отдельных элементов батареи на основе измерения внутренних параметров (SOC, SOH) для достижения оптимальной производительности блока батарей;
- контроль внутренней температуры батарейного блока и терморегулирование во избежание необратимого повреждения;
- выявление и обработка ошибок.

Диагностика неисправностей литийионных накопителей энергии является одной из задач, решаемой BMS, и совершенный метод диагностики неисправностей может обеспечить безопасную работу СНЭЭ.

Неисправности литийионных накопителей энергии можно разделить на четыре вида:

1. Отказ системы безопасности — отказ, угрожающий безопасности пользователя, в основном вызванный тепловым выходом батареи из строя, например возгоранием аккумуляторного блока. Когда температура литиевого аккумулятора превышает 150 °С, элемент может загореться и взорваться.

2. Отказ аккумулятора — отказ батареи, в основном вызван случайным приостановлением зарядки и разрядки батареи, нарушающим нормальную работу системы накопления энергии. Такие отказы в основном вызваны внешним коротким замыканием батареи, нарушением изоляции батареи, перезарядкой, разрядкой, перегревом батареи, слишком большим зарядным и разрядным током.

3. Общие неисправности не приводят к прекращению работы системы хранения энергии, но влияют на емкость батареи и скорость заряда-разряда. К этому типу неисправностей относятся в основном неисправности, связанные с перепадом давления и температуры в батарее.

4. Аппаратные сбои вызваны отказом блока сбора информации о напряжении, токе, температуре и изоляции батареи, информация оказывается неточной, BMS не может эффективно управлять системой накопления энергии на основе собранной информации, система накопления энергии не может продолжать нормально работать. Этот тип неисправности в основном вызван нарушениями в линиях связи и питания датчиков.

В настоящее время основным методом диагностики неисправностей систем хранения энергии является метод диагностики неисправностей на основе моделей. Основная исследовательская трудность этого метода заключается в определении порога срабатывания сигнализации о неисправностях. В силу различных причин, таких как шумы датчиков системы, ошибки при сборе информации и погрешности в точности моделирования, слишком низкое пороговое значение приводит к ложным срабатываниям системы диагностики неисправностей. Если же порог слишком высок, то неисправность будет пропущена, что повлияет на общую безопасность эксплуатации системы хранения энергии. В работе Liu [1] были предложены методы диагностики и пороговые значения для различных типов неисправностей аккумуляторных батарей, например предложен метод диагностики и выявления неисправностей датчиков аккумуляторных батарей на основе модели с низкой вычислительной сложностью. Wu [2] провел серию экспериментов по тестированию характеристик неисправностей батарей при перезаряде, разряде и работе при низких температурах, Chen [3] исследовал характеристики неисправностей батарей при внешних коротких замыканиях.

Состояние заряда (State of charge, SOC) — это важный параметр, характеризующий состояние батареи, определяемый как количество заряда, которое имеет батарея при определенной температуре. Состояние полностью заряженной батареи при определенной температуре определяется как 100%, а состояние заряда, когда батарея уже не может разрядиться, — как 0%. Состояние заряда литиевых батарей является одним из наиболее критичных параметров для работы BMS, точная оценка SOC аккумуляторных батарей имеет большое значение для безопасности и производительности систем хранения энергии. Основными методами оценки SOC являются метод напряжения разомкнутой цепи, метод оценки внутреннего сопротивления и метод интегрирования ампер-времени.

Метод напряжения разомкнутой цепи — данный метод оценки SOC основан на зависимости между напряжением разомкнутой цепи (OCV) и SOC батареи. Различные типы батарей имеют определенные значения разности электрических потенциалов между электродами при отсутствии тока в цепи для различных значений SOC. Соответствие между SOC и OCV является нелинейным, поэтому, если для оценки SOC используется метод напряжения разомкнутой цепи, необходимо предварительно построить кривую OCV-SOC.

На рис. 2 показана кривая OCV-SOC батареи LiFePO₄, измеренная Китайской литиевой ассоциацией [4]. Метод напряжения разомкнутой цепи имеет преимущество быстрого и недорогого измерения, но на его точность сильно влияют длительная эксплуатация и экстремальные температурные условия, и этот метод не позволяет проводить мониторинг в режиме реального времени, то есть осуществлять функциональную диагностику СНЭЭ.

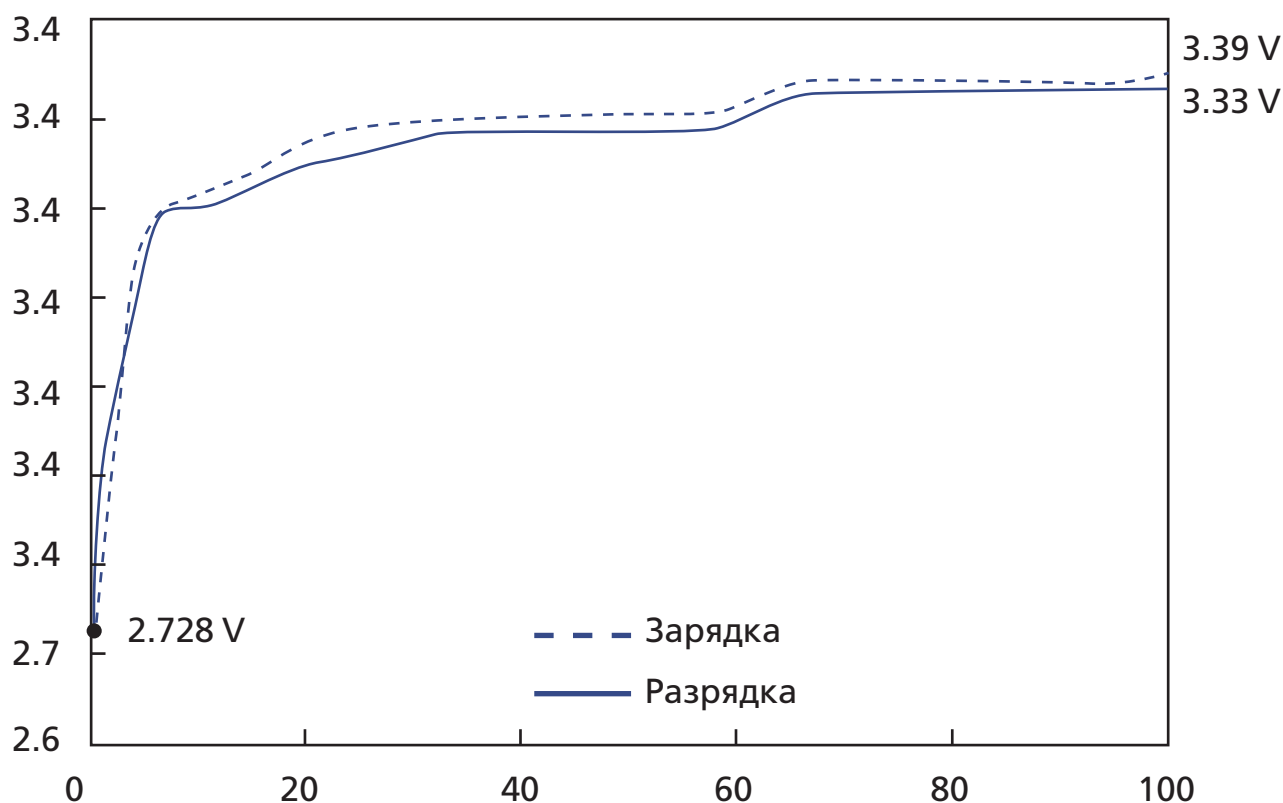


Рис. 2. Кривая OCV-SOC литий-железо-фосфатного аккумулятора

Метод оценки SOC по внутреннему сопротивлению — при этом методе используется зависимость между внутренним сопротивлением батареи и SOC. Обычно производитель батареи калибрует батарею при различных значениях SOC и строит кривую SOC-внутреннего сопротивления. Текущее состояние батареи можно оценить, сравнив фактически измеренное значение внутреннего сопротивления со значением на кривой. Точность метода ограничена рядом факторов, таких как колебания температуры и состояние контактных поверхностей батареи и т. п. Внутреннее сопротивление батареи R_0 в реальном времени может быть измерено в соответствии с изменениями напряжения и тока по следующей формуле:

$$R_0 + R_r = \Delta U / \Delta I$$

где: ΔU — разница между двумя измеренными значениями напряжениями;

ΔI — разница между двумя измеренными значениями тока; R_p обозначает поляризованное внутреннее сопротивление литиевой батареи. Хотя этот метод может быть объединен с методом интегрирования по ампер-времени для оценки SOC силовых батарей на поздней стадии разряда, применение этого метода становится менее популярным по мере развития других интеллектуальных алгоритмов.

Метод ампер-временного интегрирования позволяет оценить SOC, отслеживая накопление тока во время зарядки и разрядки батареи. Уравнение для расчета SOC методом ампер-временного интегрирования выглядит следующим образом:

$$S_c = S_{co} - \frac{\int I_{eff} dt}{Q_{max}},$$

где S_c — остаточный заряд; S_{co} — начальный остаточный заряд; I_{eff} — ток батареи, который содержит внешний ток заряда и разряда, а также ток саморазряда; t — текущее время работы; Q_{max} — теоретическая максимальная емкость батареи.

Данный метод обеспечивает оценку SOC в реальном времени и более прост в реализации. В то же время метод ампер-временного интегрирования имеет определенные недостатки. Например, при длительной эксплуатации могут накапливаться ошибки интегрирования, что приводит к неточной оценке SOC. Этот метод обычно не учитывает старение батареи, что может привести к неточной оценке SOC в конце срока ее службы.

Метод интегрирования ампер-времени требует измерения только величины тока батареи по сравнению с методом сопротивления, поэтому его схема проще.

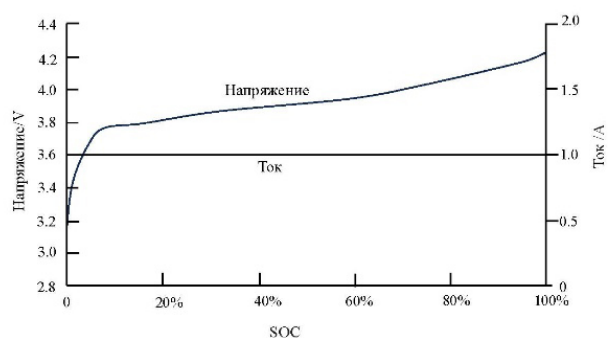
Каждый из этих трех методов оценки SOC имеет свои преимущества и недостатки, и на практике их обычно комбинируют для получения результатов, более соответствующих реальному рабочему состоянию батареи. Например, возможно объединить метод напряжения разомкнутой цепи с методом интегрирования по ампер-часам и использовать метод напряжения разомкнутой цепи для измерения SOC до и в конце работы батареи, чтобы скорректировать SOC, измеренное методом интегрирования по ампер-часам.

В процессе заряда-разряда литийионного аккумулятора существует определенная зависимость между током и напряжением. Наблюдая и анализируя кривые заряда-разряда, можно получить следующую информацию для оценки SOC.

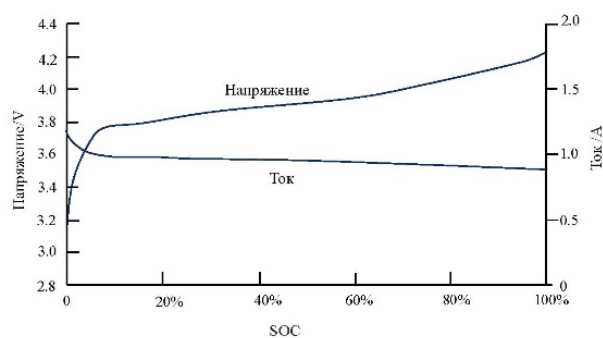
Информация о напряжении: как уже говорилось выше, изменение напряжения на кривой заряда-разряда может дать некоторые подсказки о SOC аккумулятора. В различных диапазонах SOC характер изменения напряжения батареи различен, поэтому SOC можно оценить на основе тенденции изменения напряжения.

Информация о токе, характеристики тока на кривой заряда-разряда также могут дать некоторую информацию о SOC. Изменение тока может характеризовать состояние зарядки и разрядки батареи.

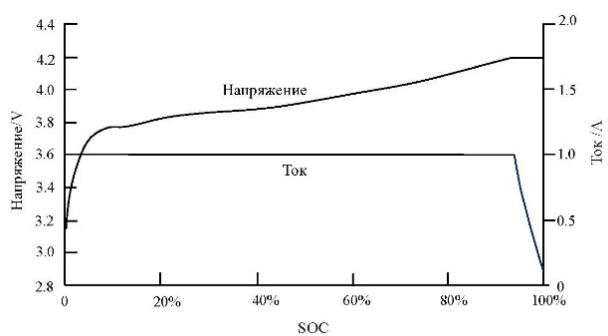
В соответствии с различными методами зарядки и разрядки процесс зарядки и разрядки литиевой батареи в основном подразделяется на зарядку постоянным током, зарядку постоянной мощностью, зарядку постоянным током и постоянным напряжением. Ток в процессе зарядки сначала остается постоянным и неизменным. Когда напряжение заряжается до верхней границы напряжения, то напряжение будет оставаться постоянным и неизменным, а ток постепенно уменьшается до заданного значения после окончания зарядки. На рис. 3.6 показаны кривые тока и напряжения этих процессов зарядки и разрядки.



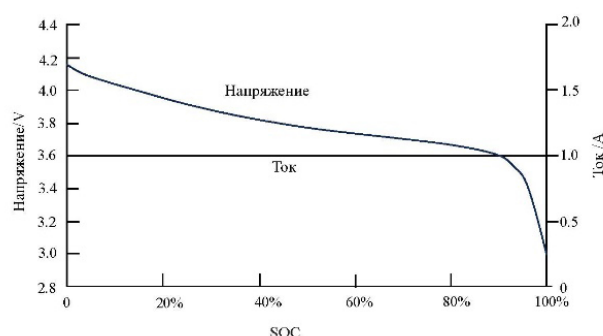
3.1 Зарядку постоянным током



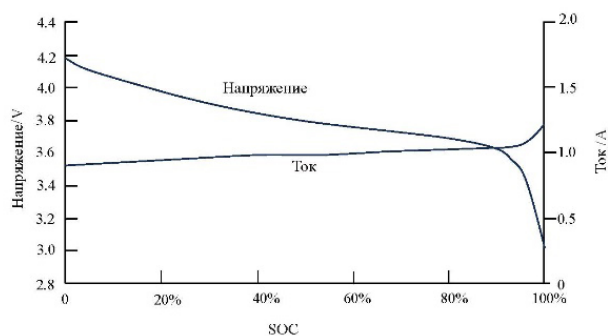
3.2 Зарядку постоянной мощностью



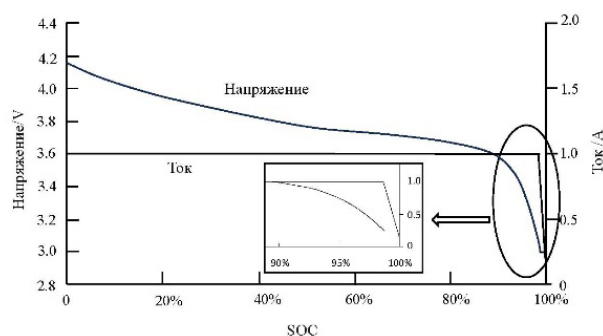
3.3 Зарядку постоянным током и постоянным напряжением



3.4 Разрядку постоянным током



3.5 Разрядку постоянной мощностью



3.6 Разрядку постоянным током и постоянным напряжением

Рис. 3. Кривые тока и напряжения в процессе зарядки и разряда литиевой батареи

Для оценки SOC батареи может быть использована математическая модель аккумуляторной батареи. В соответствии с различиями в методах моделирования существует три основных типа математических моделей аккумуляторов:

Моделирование электрохимических процессов, которое используется для описания процессов электрохимических реакций в батарее. Физико-химические процессы, такие как перенос электронов и ионов, химические реакции, перенос заряда и энергии в батарее, моделируются с помощью дифференциальных уравнений. Несмотря на высокую точность, они обычно используются на этапе исследований и разработки батарей из-за высокой вычислительной сложности, что затрудняет их непосредственное применение в системах управления батареями с ограниченными вычислительными ресурсами.

Моделирование с управляемыми данными — модели, в которых взаимосвязь между входными и выходными сигналами батареи устанавливается путем анализа большого количества фактических данных о работе батареи и применения алгоритмов искусственного интеллекта. В отличие от традиционных моделей, основанных на физических принципах, в моделях, управляемых данными, не требуется учитывать внутреннее устройство батареи, а для изучения ее поведения используются сами данные. Точность и эффективность таких моделей в значительной степени зависит от объема и качества имеющихся данных, а точное моделирование может быть достигнуто только при наличии достаточного количества достоверных данных.

Модель в виде эквивалентной схемы использует электронные компоненты для имитации таких характеристик, как сопротивление, задержка заряда и разряда внутри батареи, что позволяет смоделировать поведение батареи. Эта модель имеет относительно простую архитектуру и сравнительно небольшую вычислительную нагрузку, поэтому она широко используется в таких областях, как оценка состояния батареи и управление зарядом-разрядом. Однако модель эквивалентной схемы имеет ряд ограничений, включая сложность точного описания нелинейного отклика, температурных эффектов и многочисленных химических реакций в батарее, поэтому в некоторых сценариях применения для более точного моделирования поведения батареи необходимо рассматривать более сложные модели. Некоторые из наиболее распространенных моделей эквивалентных цепей — модель Ринта (R_{int}), модель Тевенина, модель PNGV и многопорядковая RC-модель.

Самой простой моделью является модель Ринта, которая состоит из линейного внутреннего сопротивления R_0 и последовательно включенного источника питания постоянного напряжения U_0 , U_t — это напряжение на выходе тестируемого одиночного элемента.

Из-за низкой точности RC-модели первого порядка и исходя из вычислительных возможностей BMS более широко используется RC-модель второго порядка (рис. 4). Поляризационное сопротивление электрохимической реакции

батареи моделируется в виде резистора R_s , концентрационное поляризационное сопротивление моделируется с помощью R_L , поляризационная емкость батареи моделируется емкостью C_s , а концентрационная поляризационная емкость моделируется $-C_L$, R_c моделирует увеличение внутреннего сопротивления с увеличением количества отработанных элементов циклов заряда-разряда.

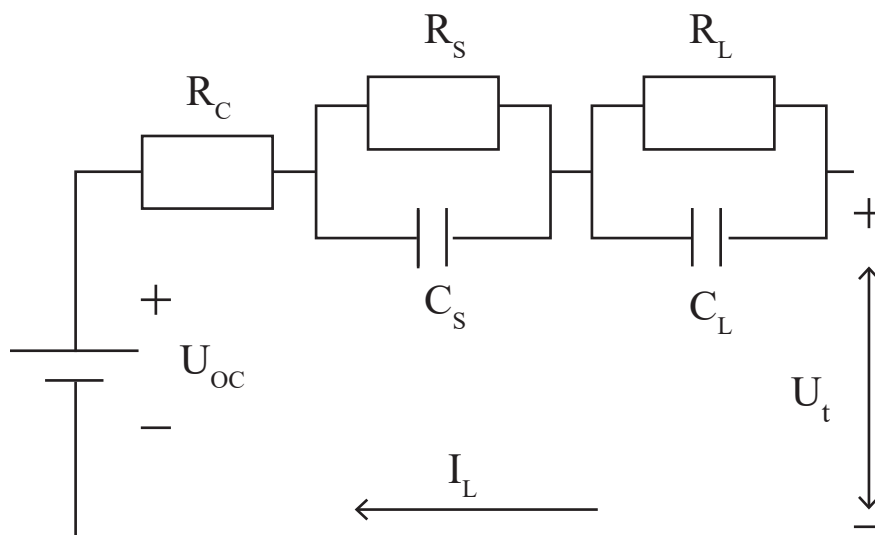


Рис. 4. Модель эквивалентной RC-цепи второго порядка для литиевого аккумулятора

У Сяохуэй и др. [7] предложили нелинейную модель оптимизации по методу наименьших квадратов для эквивалентной RC-модели литиевых батарей второго порядка и использовали алгоритм LM (Levenberg — Marquardt) для решения задачи определения RC-параметров, который относится к разновидности алгоритмов с зависимой областью. Этим алгоритмом возможно быстро и точно определить значения RC-параметров реальных батарей в различных состояниях SOC.

Заключение. Основной задачей системы управления батареями является повышение безопасности и экономичности литийионной системы хранения энергии. Для выполнения этого требования BMS должна точно определять внутренние параметры батареи и точно рассчитывать значение ее SOC, а также точно отслеживать и диагностировать возникающие неисправности. Однако из-за крайне нелинейных и чувствительных к температуре характеристик литиевых батарей, а также несогласованности каждого параметра после формирования батареи в группу значительно усложняет алгоритм работы BMS по управлению балансировкой и определению неисправностей СНЭЭ в режиме реального времени. Несмотря на массовое производство BMS, алгоритмы ее работы все еще находится на стадии исследований в следующих основных направлениях:

1. Повышение точности измеряемых данных — оценка ненаблюдаемых параметров элемента в значительной мере зависит от достоверности, точности, частоты обновления и объема основных данных батареи;

2. Создание точной цифровой модели батареи с хорошими динамическими характеристиками, высокой точностью, пригодной для сильноточных режимов зарядки и разрядки, соответствующих условиям работы литийионных систем хранения энергии. Имеет большое значение для своевременного обнаружения и диагностики неисправностей СНЭЭ. Сочетание алгоритмической модели и компьютерного интеллектуального управления с нечеткой логикой позволяет точно оценить SOC аккумуляторного блока с полным учетом теплового процессов, электрических характеристик, срока службы и безопасности, а также оценить состояние и оставшееся время использования аккумуляторного блока.

Библиографический список

1. Лю Ц., Хэ Х. Обнаружение и изоляция дефектов датчика для литийионного аккумуляторного блока в электромобилях с использованием адаптивного расширенного фильтра Калмана // Прикладная энергетика. 2017. № 185. С. 2033–2044.
2. U Ch., Chzhu Ch., Ge Ja. A new fault diagnosis and prognosis technology for high-power lithium-ion battery // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. 45 (7): 1533–1538.
3. Чэнь З., Сюн Р., Тянь Ц. и др. Модельно-ориентированный подход к диагностике неисправностей во внешней короткой цепи литийионного аккумулятора, используемого в электромобилях // Прикладная энергетика. 2016. № 184. С. 365–374.
4. Анализ характеристик кривой напряжения холостого хода литий-железо-фосфатного аккумулятора [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eet-china.com/mp/a258915.html>
5. Комплексный анализ разряда литиевого аккумулятора [Электронный ресурс]. URL: https://www.fangzhenxiu.com/post/7282360/?uri=24_bUEtxGcRkc1
6. Сравнение 12 моделей кривых заряда и разряда литийионных аккумуляторов. [Электронный ресурс]. URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/623571540>
7. У Сяохуэй, Чжан Сян. Идентификация параметров модели второго порядка эквивалентной цепи RC для литиевых аккумуляторов // Журнал Нанкинского университета. 2020. № 56 (5). С. 755–761.

Дата поступления: 25.12.2023

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация:

СИ ЧЖЭНЬЧАО — аспирант, xizhenchaogege@gmail.com

КОНСТАНТИНОВ Константин Витальевич — доцент, const.festu@mail.ru

Review of methods for monitoring and diagnosing electrical energy storage systems

Xi Zhenchao, K. V. Konstantinov

St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", 5, st. Professora Popova, St. Petersburg, 197022, Russia

For citation: *Si Chzhe`n`chao, Konstantinov K. V. Obzor metodov kontrolya i diagnostiki sistem nakopleniya e`lektricheskoy e`nergii // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 1. P. 143–154. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-143-154*

Abstract

Goal: review of the current situation and perspective directions for the development of technology for testing electrical energy storage systems based on lithium-ion batteries. **Methods:** using literature analysis, a review and systematization of the history of lithium-ion battery system monitoring technology development was conducted and the advantages and disadvantages of the most common state of charge (SOC) methods were compared. **Results:** lithium-ion battery systems represent an inevitable trend in the future of electrochemical energy storage. To increase their stability and economic efficiency, it is necessary that diagnostic systems allow the internal parameters of the battery to be determined with sufficient accuracy and the types of faults to be quickly determined. In the future, research in this area will continue to improve the accuracy of data acquisition systems and create accurate digital battery models. **Practical significance:** a review and systematization of the history of development of technology for monitoring the condition of lithium-ion battery systems was carried out in order to identify current problems and promising directions for future research in this area.

Keywords: electrical energy storage systems, lithium-ion battery diagnostic technology, battery management systems ampere-time integration method, open circuit voltage method second order RC equivalent circuit model, data acquisition systems, digital battery model.

References

1. Lju C., Hje H. Obnaruzhenie i izoljacija defektov datchika dlja litij-ionnogo akku-mul-jatornogo bloka v jelektromobiljah s ispol'zovaniem adaptivnogo rasshirennogo fil'tra Kalmana // Prikladnaja jenergetika. 2017. No. 185. P. 2033–2044. (In Russian)
2. U Ch., Chzhu Ch., Ge Ja. A new fault diagnosis and prognosis technology for high-power lithium-ion battery // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. No. 45 (7): 1533-1538. (In Russian)
3. Chjen' Z., Sjun R., Tjan' C. i dr. Model'no-orientirovannyj podhod k diagnostike neis-pravnostej vo vneshnej korotkoj cepi litij-ionnogo akkumuljatora, ispol'zuemogo v jelektromobil-jah // Prikladnaja jenergetika. 2016. No. 184. P. 365–374. (In Russian)
4. Analiz harakteristik krivoj naprjazhenija holostogo hoda litij-zhelezo-fosfatnogo akkumul-jatora [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.eet-china.com/mp/a258915.html> (In Russian)
5. Kompleksnyj analiz razrjada litievogo akkumuljatora [Jelektronnyj resurs]. URL: https://www.fangzhenxiu.com/post/7282360/?uri=24_bUEtxGcRkc1 (In Russian)
6. Sravnenie 12 modelej krivyh zarjada i razrjada litij-ionnyh akkumuljatorov. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/623571540> (In Russian)

7. U Sjaohujej, Chzhan Sjan. Identifikacija parametrov modeli vtorogo porjadka jekvivalentnoj cepi RC dlja litievyh akkumuljatorov // Zhurnal Nankinskogo universiteta. 2020. No. 56 (5). P. 755–761. (In Russian)

Received: 25.12.2023

Accepted: 01.03.2024

Author's information:

XI ZHENCHAO — PhD student. xizhenchaogege@gmail.com

Konstantin V. KONSTANTINOV — Associate Professor, const.festu@mail.ru