УДК 621.355.9 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-9-104-112

Метод сегментированной нормализации трендов импеданса литиевых аккумуляторов при АС-возбуждении

Си Чжэньчао, К. В. Константинов✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ const.festu@mail.ru

Аннотация. Цель настоящего исследования состоит в разработке метода сегментированной нормализации трендов импеданса литиевых аккумуляторов при воздействии переменного тока для получения сопоставимого усредненного тренда и последующего анализа их деградации. В качестве методологической основы используется формирование мгновенных импедансных последовательностей по синхронно зарегистрированным сигналам, разбиение данных на заряд/разряд по полярности тока и динамике напряжения, а также нормализация прогресса участка на ось $p \in [0, 1]$ с последующей статистической агрегацией. Такая схема позволяет согласовать данные при различной длительности участков и неодинаковой плотности отсчетов. Эксперименты на элементах разных форм-факторов, включая образцы с глубокой деградацией, показали воспроизводимость усредненных трендов и их чувствительность к изменению состояния здоровья аккумуляторов.

Ключевые слова: АС-импеданс, литиевый аккумулятор, мгновенный импеданс, анализ тренда, сегментация по полярности тока, нормализация по времени, система управления батареей, состояние здоровья

Для цитирования: Си Чжэньчао, Константинов К. В. Метод сегментированной нормализации трендов импеданса литиевых аккумуляторов при АС-возбуждении // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 104–112. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-104-112.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Method for Segmented Normalization of Lithium-Battery Impedance Trends under AC Excitation

Xi Zhenchao, K. V. Konstantinov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ const.festu@mail.ru

Abstract. This study aims to develop a segmented normalization method for alternating-current impedance trends of lithium batteries to obtain comparable averaged trends for subsequent degradation analysis. The method estimates instantaneous impedance sequences from synchronously acquired signals, segments data into charge/discharge parts based on current polarity and voltage dynamics, and maps each segment onto a normalized axis $p \in [0, 1]$ followed by statistical aggregation. This design reconciles recordings with different segment durations and non-uniform sampling density. Experiments on cells of different form factors, including deeply degraded samples, demonstrate reproducible averaged trends and sensitivity to changes in state of health.

Keywords: alternating-current impedance, lithium battery, instantaneous impedance, trend analysis, current-polarity segmentation, time normalization, battery management system, state of health

For citation: Xi Zhenchao, Konstantinov K. V. Method for segmented normalization of lithium-battery impedance trends under AC excitation // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 104–112. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-104-112.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Введение. Современные литий-ионные аккумуляторы широко применяются в составе систем накопления электрической энергии (СНЭЭ), источниках резервного и бесперебойного питания, а также в других ответственных технических установках, где предъявляются повышенные требования к надежности и безопасности эксплуатации. СНЭЭ – это крупномасштабными энергетическими комплексами: в реальных сетевых проектах литий-ионные системы хранения энергии подключаются к шинам среднего напряжения (например, 35 кВ) через трансформаторные узлы, а их установленная мощность может составлять от нескольких до десятков мегаватт [1]. В силу высокой энергоемкости и сложности эксплуатационных режимов особое значение приобретает эксплуатационная диагностика аккумуляторов. В процессе старения изменяются внутренние параметры аккумулятора – прежде всего сопротивление, поляризационные и диффузионные составляющие, что приводит к изменению доступной емкости, мощности и тепловых характеристик [2]. Поэтому требуется количественно оценивать степень деградации и формировать диагностические признаки для последующего определения состояния здоровья аккумулятора (State of Health, SOH), чтобы обеспечить своевременное выявление старения и снизить риск отказов и тепловых инцидентов, включая вероятность возгорания.

С конструктивной и функциональной точки зрения СНЭЭ представляет собой систему, в которой аккумуляторная батарея (АКБ), система управления батареей (Battery Management System, BMS) и система преобразования энергии (Power Conversion System, PCS) работают во взаимосвязи (см. рис. 1). Аккумуляторная батарея – это основной объект накопления энергии и одновременно объектом диагностики, параметры которого изменяются по мере старения. BMS обеспечивает сбор, первичную обработку и интерпретацию измерительных данных, оценивает текущее состояние батареи, включая уровень заряда (State of Charge, SOC) и состояние здоровья, и формирует ограничения, необходимые для ее безопасной эксплуатации. PCS, в свою очередь, осуществляет двунаправленное преобразование энергии между аккумуляторной батареей, звеном постоянного тока и внешней сетью или нагрузкой, реализует режимы заряда и разряда, а также, работая в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ), задает фактические токовые и энергетические условия функционирования аккумулятора, при этом коэффициент заполнения Q определяет временную структуру управляющих импульсов и тем самым влияет на характер токового отклика батареи. В такой архитектуре задачи диагностики должны рассматриваться не изолированно, а в контексте совместного функционирования батареи, BMS и PCS.

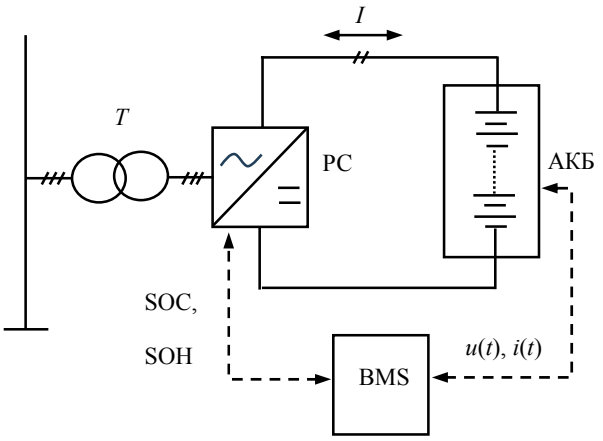

Рис. 1. Структура СНЭЭ и взаимосвязь аккумуляторной батареи, PCS и BMS
Fig. 1. Structure of the battery energy storage system and the interrelationship of the battery pack, PCS and BMS

На рисунке приняты следующие обозначения: T – силовой трансформатор; I – ток аккумуляторной батареи; $u(t)$ – напряжение аккумуляторной батареи; $i(t)$ – сила тока аккумуляторной батареи. Сплошными линиями показаны силовые цепи, штриховыми – информационные и управляющие связи.

В связи с этим особое значение приобретает выбор диагностических признаков, способных сохранять информативность в условиях длительной эксплуатации и изменяющихся режимов работы [3], [4]. Одним из перспективных источников диагностической информации служит импеданс при воздействии переменного тока (Alternating Current, AC), чувствительный к омическому сопротивлению, электрохимическим и межфазным процессам в АКБ, а также к массообменным ограничениям [5]. AC-импеданс широко используют для диагностики состояния по ограниченному набору частотных точек и производным показателям (модуль/фаза, эквивалентные сопротивления), что позволяет снизить измерительную и вычислительную сложность [5], [6]. Вместе с тем подчеркивается, что такие признаки существенно зависят от условий (SOC, температура, режим нагрузки) и требуют корректного сопоставления измерительных серий; без нормализации данных переносимость результатов между циклами оказывается ограниченной [7].

Обработка AC-импеданса для оценки SOH. Подход основан на вычислении последовательности мгновенного импеданса по синхронно зарегистрированным сигналам, сегментации данных на участки заряда и разряда по полярности тока, а также на приведении каждого участка к единой шкале нормированного времени с последующей статистической агрегацией. Предлагаемая процедура обеспечивает согласование серий измерений и позволяет формировать воспроизводимые усредненные тренды, служащие основой для выделения диагностических признаков и дальнейшего моделирования показателей состояния аккумуляторов.

1. Экспериментальная система измерения импеданса. Экспериментальная установка состоит из понижающего преобразователя постоянного тока (DC/DC-преобразователя), исследуемого аккумуляторного элемента, модуля измерения и регистрации; схема электрических соединений приведена на рис. 2.

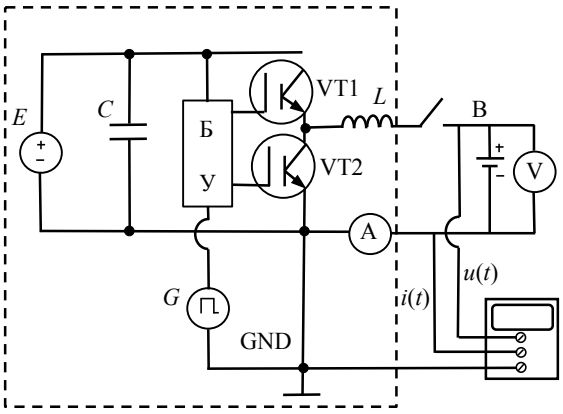

Рис. 2. Система возбуждения на базе ШИМ-силового каскада и синхронного съема данных для измерения импеданса
Fig. 2. Excitation system based on a PWM power stage and synchronous data acquisition for impedance measurement

На рис. 2 приняты следующие обозначения: E – источник постоянного напряжения; C – сглаживающий конденсатор звена постоянного тока; G – генератор ШИМ-сигнала; GND – общая точка (земля) измерительной схемы; A – амперметр (датчик тока); V – вольтметр (датчик напряжения).

Модуль DC/DC-преобразователя реализован на управляемых силовых ключах VT1 и VT2, блок управления ключами (БУ) – формирует ШИМ-сигнал с частотой f_{PWM} =1 кГц. Выход силового каскада подключен к последовательной ветви «индуктивность L – исследуемый аккумулятор B», эквивалентной силовой цепи PCS. Протекающий в цепи элемента B ток $i(t)$ вследствие наличия индуктивности изменяется непрерывно и имеет форму, близкую к треугольной, когда как форма отклика напряжения $u(t)$ определяется внутренним сопротивлением элемента [8]. Ток $i(t)$ и напряжение $u(t)$ контролируются измерительными каналами и синхронно регистрируются модулем измерения-записи (осциллографом), после чего используются для расчета импеданса и извлечения диагностических признаков.

Временные диаграммы напряжения и тока приведены на рис. 3.

Коэффициент заполнения Q определяется как отношение длительности импульса τ к периоду ШИМ-сигнала T: $Q = \tau/T$, где T – период ШИМ-сигнала, τ – длительность импульса, t – время.

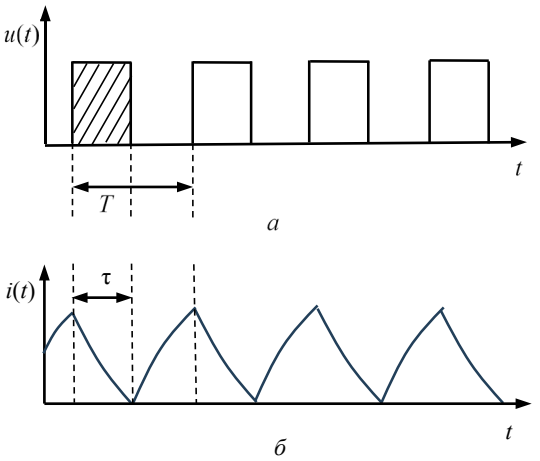

Рис. 3. Схема формирования треугольного тока в ветви при прямоугольном ШИМ-возбуждении: *а* – напряжение $u(t)$; *б* – ток $i(t)$
Fig. 3. Formation of triangular current in the branch under rectangular PWM excitation: *а* – voltage $u(t)$; *б* – current $i(t)$

Дополнительные трудности создает неоднородность экспериментальных серий: участки заряда и разряда различаются по длительности, плотности отсчетов и уровню воздействия, а в зарегистрированных сигналах присутствуют области малых токов и единичные выбросы, что затрудняет прямое сравнение импедансных кривых между циклами и различными днями измерений. Ситуация дополнительно усложняется тем, что СНЭЭ функционируют в различных режимах (ведущий, ведомый, автономный, ожидание, гибернация), при переходах между которыми существенно меняются профиль тока, SOC и тепловые условия, что, в свою очередь, приводит к вариативности импедансных характеристик. Поэтому для обеспечения сопоставимости импедансных данных в прикладной эксплуатации требуются устойчивые процедуры обработки, кор-

ректно работающие при неоднородности серий и наличии выбросов [9], [10].

2. Расчет импеданса на основе мгновенного отклика аккумулятора. Наряду с использованием действующих значений напряжения и тока, импеданс может быть рассчитан по их мгновенным значениям как отношение $Z(t) = u(t)/i(t)$. В этом случае сигналы напряжения и тока рассматриваются во временной области и отражают отклик аккумулятора на приложенное воздействие. В процессе старения их мгновенные изменения характеризуют динамику отклика аккумулятора и формируют массив данных для последующего анализа.

Вектор **x** представляет собой последовательность синхронно зарегистрированных пар мгновенных значений напряжения и тока для рассматриваемой записи:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} U_{t1};\ I_{t1} \\ U_{t2};\ I_{t2} \\ \dots \\ U_{t3};\ I_{t3} \end{pmatrix}.$$

Импеданс определяется на основе мгновенного отклика напряжения и тока, отражающего реакцию батареи на внешнее воздействие:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{t1} = \dfrac{U_{t1}}{I_{t1}} \\ Z_{t2} = \dfrac{U_{t2}}{I_{t2}} \\ \dots \\ Z_{t3} = \dfrac{U_{t3}}{I_{t3}} \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

в котором Z_{ti} – импеданс исследуемой батареи; U_{ti} – мгновенный отклик напряжения исследуемой батареи; I_{ti} – мгновенный отклик тока исследуемой батареи.

3. Расчет и обработка мгновенного импеданса. Для литиевых элементов в работе в качестве анализируемого сигнала используется импеданс Z_t. По физическому смыслу он комплексно отражает омическое сопротивление, поляризационные и диффузионные эффекты в данный момент времени. Рассчитанный импеданс Z_t далее используется как входной сигнал программы анализа тренда для извлечения закономерностей его эволюции внутри отдельного участка (заряд/разряд) и для построения статистически устойчивых и сопоставимых средних трендов и наборов признаков.

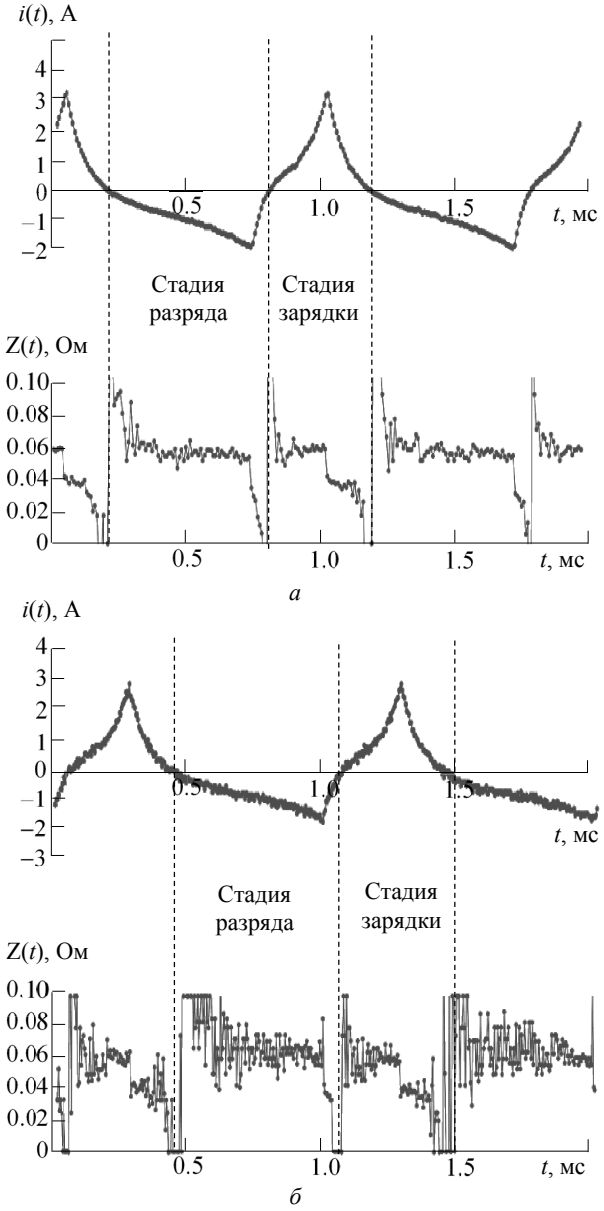

Рис. 4. Разделение мгновенного импеданса по полярности тока с различным числом отсчетов:
а – 1 048 564; *б* – 4096
Fig. 4. Separation of instantaneous impedance by current polarity with different numbers of samples:
а – 1 048 564; *б* – 4096

Здесь принят единый принцип представления данных – разделение по полярности тока: импедансная последовательность разделяется на участок заряда $(i(t) > 0)$ и участок разряда $(i(t) < 0)$. На рис. 4 приведены примеры такого разделения для двух вариантов регистрации с различным числом отсчетов. Включение обоих вариантов позволяет показать, что используемый подход не привязан к конкретному измерительному устройству или фиксированной длине записи и может применяться при различных условиях регистрации сигнала.

4. Алгоритм построения среднего тренда импеданса. Далее, после вычисления последовательности мгновенного импеданса $Z(t)$ и ее разбиения на участки заряда и разряда по знаку тока (рис. 4), выполняется построение сопоставимых во времени средних трендов и статистических характеристик отдельно для каждого участка [11].

Для выполнения указанной обработки создано программное средство, реализующее определение границ выделенных участков, последующее усреднение и формирование итогового набора признаков в единой системе координат. Обобщенная блок-схема алгоритма приведена на рис. 5.



Рис. 5. Модули программы усреднения тренда импеданса заряда/разряда
Fig. 5. Modules of the program for averaging the charge/discharge impedance trend

На рис. 5 $T_{\min}$ – минимальная допустимая длительность сегмента; $G_{\max}$ – максимально допустимая длительность разрыва между соседними фрагментами, при которой они объединяются в один сегмент; $N_{\min}$ – минимально допустимое число валидных наблюдений в узле общей сетки прогресса.

На вход алгоритма подаются синхронно зарегистрированные временные ряды напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$. Мгновенный импеданс рассчитывается во временной области по выражению (1). Для исключения деления на малые токи вводится абсолютный порог отсечения $i_{\text{cut}} > 0$:

$$Z(t) = \begin{cases} \dfrac{u(t)}{i(t)}, & |i(t)| \geq i_{\text{cut}}; \\ \text{NAN}, & |i(t)| < i_{\text{cut}}. \end{cases}$$

Здесь NAN (Not a Number) обозначает отсутствие допустимого числового значения; такое значение присваивается точкам, исключенным из дальнейшей обработки вследствие малого тока.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных выполняется по схеме, представленной на рис. 5, и направлена на получение сопоставимого усредненного тренда импеданса для одного композитного цикла (заряд + разряд) при различной длительности участков и неодинаковой плотности отсчетов. Кроме того, для подавления единичных промахов применяется ограничение по амплитуде импеданса (клиппирование – функция clip):

$$Z(t) \leftarrow \text{clip}\left(Z(t),\ -Z_{\max}, Z_{\max}\right),$$

где $Z_{\max}$ – фиксированный предел, связанный с выбранным диапазоном отображения/обработки.

Далее выполняется сегментация временного ряда на непрерывные участки заряда и разряда на основе порога входа I_{thr} с учетом минимальной допустимой длительности сегмента $T_{\min}$ и максимально допустимой длительности разрыва $G_{\max}$, при которой близлежащие фрагменты объединяются в один сегмент. Полученные сегменты используются для формирования «композитных» циклов как пары соседних участков вида «заряд → разряд»:

$$p = \frac{t - t_0}{t_{1,s} - t_{0,s}};\ 0 \leq p < 1,$$

где $t_{0,s}$ и $t_{1,s}$ соответствуют началу и окончанию сегмента. Введение p устраняет несопоставимость временных масштабов между реализациями возбуждения и позволяет приводить участки различной длительности к единой оси.

Ось прогресса дискретизируется на N_{bin} интервалов разбиения, в качестве узлов общей сетки используются центры интервалов $p_k\left(k = 1, \ldots, N_{\text{bin}}\right)$. Для каждого сегмента выполняется пере-

счет $Z(t)$ на общую сетку p_k (линейная интерполяция по прогрессу), после чего для каждого композитного цикла с номером c формируется объединенная траектория:

$$Z^{(c)}(p_k) = \begin{cases} (Z_{\text{ch}}^{(c)}(p_k) + Z_{\text{dis}}^{(c)}(p_k))/2; \\ Z_{\text{ch}}^{(c)},\ Z_{\text{dis}}^{(c)} \text{ определены}; \\ Z_{\text{ch}}^{(c)}(p_k) \text{ или } Z_{\text{dis}}^{(c)}(p_k); \\ \text{определено только одно}; \\ \text{NAN иначе}. \end{cases}$$

Далее выполняется межцикловая статистическая агрегация (функции mean (среднее) и median (медиана)) по каждому p_k :

$$\bar{z}(p_k) = \text{mean}\left\{Z^{(c)}(p_k)\right\}_c;$$
$$\tilde{z}(p_k) = \text{median}\left\{Z^{(c)}(p_k)\right\}_c,$$

а также вычисляется число валидных наблюдений

$$N_k = \#\left\{c : Z^{(c)}(pk) \text{определено}\right\}.$$

Для обеспечения статистической надежности значения по интервалам разбиения с недостаточной заполненностью исключаются по критерию $N_k < N_{\min}$, где N_k – число валидных наблюдений в k-м узле общей сетки прогресса, а $N_{\min}$ – минимально допустимое число таких наблюдений. Символ # обозначает число элементов множества.

Для повышения устойчивости итогового тренда к выбросам и шуму предусмотрены дополнительные процедуры робастификации. При необходимости применяется винзоризация (функция winsor) усредненного ряда по процентилям α и 100 − α:

$$Z(p_k) \leftarrow \min\left[\max\left(Z(p_k), Q_a\right), Q_{100-\alpha}\right],$$

после чего допускается сглаживание по оси p скользящим средним либо скользящей медианой с окном w (в бинах). Дополнительно, как опция завершающей обработки, используется «обрезка хвоста» – удаление части тренда после экстремума при наличии устойчивого обратного хода в конечной зоне прогресса; данная операция применяется только на заключительном этапе и предназначена для подавления хвостовых артефактов, не отражающих устойчивую компоненту эволюции импеданса.

Предложенная процедура содержит настраиваемые параметры сегментации, дискретизации и робастной постобработки, выбор которых определяется уровнем шума, длительностью участков и требуемой устойчивостью итогового тренда. В настоящей работе эти параметры подбирались таким образом, чтобы обеспечить сопоставимость серий и снизить влияние кратковременных возмущений и единичных выбросов.

В качестве объектов исследования были выбраны два типа литий-ионных элементов – LIR2032 и Panasonic NCR18650B. Для обоих типов использовалась одна и та же измерительная платформа, что обеспечивает сопоставимость измерительной процедуры и последующей обработки данных. Испытания LIR2032 проводились при комнатной температуре 20 °C, чтобы на этапе первичной верификации методики максимально уменьшить влияние температурных факторов на интерпретацию результатов. Серия испытаний NCR18650B выполнялась в термокамере при постоянной температуре 60 °C; такой режим широко используется как ускоренное условие деградации, поскольку для коммерческих литий-ионных элементов показано, что повышение температуры приводит к ускорению потери емкости и росту сопротивления [12].

Для обоих типов элементов были сформированы полные серии деградации, охватывающие диапазон от начального состояния SOH = 100 % до принятой в настоящей статье конечной точки SOH = 0 %, которая соответствует снижению остаточной емкости до 80 % от начального значения. Включение LIR2032 позволяет оценить применимость алгоритма к элементам разного формфактора, а сопоставление результатов LIR2032 и NCR18650B – устойчивость выделяемых трендов при различающихся масштабах сигналов и характеристиках отклика. Для NCR18650B, помимо последовательностей $\text{SOH} = 100 \to 0$ %, дополнительно рассмотрена группа глубоко деградировавших образцов с остаточной емкостью менее 20 %, характеризующая поведение элементов, близких к отказу. При этом различия между экспериментальными сериями в основном определяются свойствами исследуемых элементов и режимами эксплуатации, тогда как процедура сегментации по знаку тока и нормализация импедансных данных во всех сериях остаются неизменными.

При сопоставлении серий LIR2032 и NCR18650B необходимо учитывать, что импедансные кривые этих элементов могут различаться по уровню и форме. Основными причинами служат:

1) различия в конструкции, геометрии, уровне емкости и электрохимической системе элементов, определяющие вклад омического сопротивления, поляризационных и диффузионных процессов и их динамику;

2) различия амплитуды токового возбуждения в экспериментах для двух типов элементов, влияющие на масштаб отклика по напряжению и току и, соответственно, на значения $Z(t)$.

На рис. 6 представлены кривые $Z(p)$, используемые для анализа изменения импедансных характеристик по мере деградации элементов. Для NCR18650B (рис. 6, *б*) сопоставлены характерные кривые, соответствующие состояниям SOH = 100 % (кривая *1*) и SOH = 0 % (кривая *2*), а также усредненная кривая (рис. 6, *в*) для подгруппы глубоко состаренных элементов с остаточной емкостью менее 20 %.

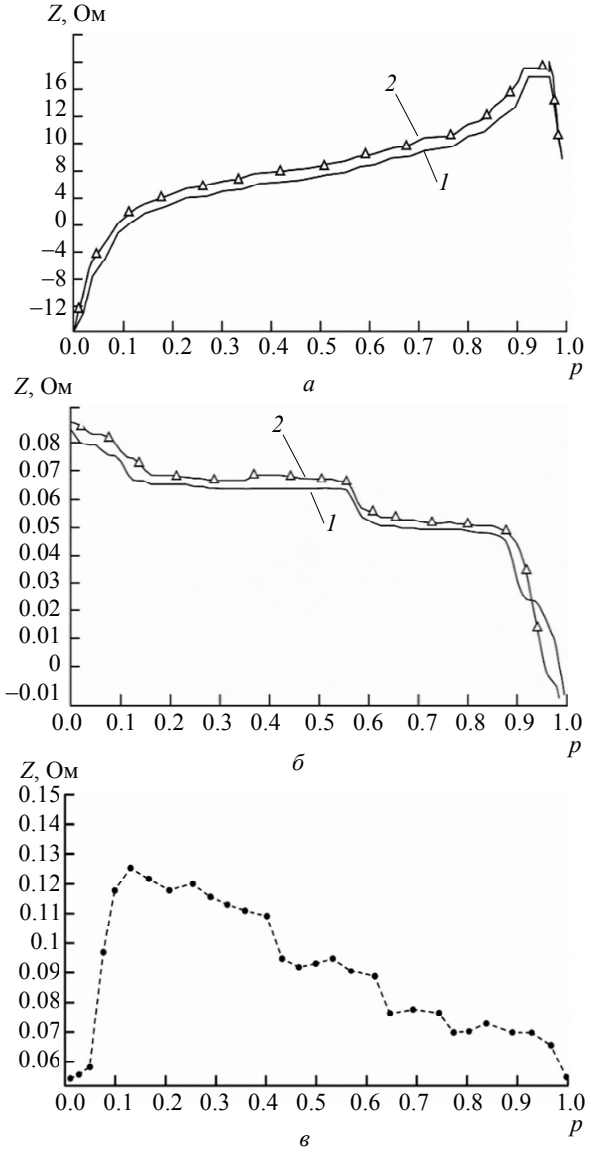

Рис. 6. Эволюция усредненного тренда $Z(p)$ для исследуемых литиевых элементов (SOH: *1* – 100 %; *2* – 0 %): *а* – LIR2032; *б* – NCR18650B; *в* – глубоко состаренные элементы NCR18650B
Fig. 6. Evolution of the averaged trend for the studied lithium cells (SOH: *1* – 100 %; *2* – 0 %): *а* – LIR2032; *б* – NCR18650B; *в* – heavily aged NCR18650B cells

Для LIR2032 и NCR18650B наблюдается различная направленность изменения тренда по прогрессу p, что отражает различия в конструктивных и электрохимических особенностях элементов (форм-фактор, архитектура и электрохимическая система) и, как следствие, различия в динамике их импедансного отклика.

В рамках каждого типа элемента сравнение кривых, размеченных по уровню SOH, показывает, что деградация сопровождается изменением как общего уровня $Z(p)$, так и формы тренда. При переходе от SOH = 100 % к SOH = 0 % наблюдаются систематическое смещение кривой и изменение положения характерных участков по оси прогресса p, что указывает на связь формы $Z(p)$ со степенью деградации.

Сопоставление базовой серии NCR18650B с группой глубоко деградировавших образцов показывает, что в условиях тяжелой деградации эти изменения становятся более выраженными: усиливается подъем плато и заметнее деформируются отдельные участки импедансной кривой. Это позволяет рассматривать такие особенности как специфические признаки глубокой деградации.

Заключение. В статье рассмотрен метод сегментированной нормализации экспериментальных данных АС-импеданса литиевых аккумуляторов, обеспечивающий построение сопоставимых усредненных трендов $Z(p)$ при неодинаковой длительности участков и неравномерной плотности отсчетов. При выполнении настоящего исследования получены следующие результаты:

1. Разработана и формализована процедура обработки, включающая расчет мгновенного импеданса по синхронно зарегистрированным $u(t)$ и $i(t)$, сегментацию на участки заряда/разряда, приведение каждого сегмента к нормированной координате прогресса p и межцикловую статистическую агрегацию, что позволяет формировать воспроизводимые усредненные тренды $Z(p)$.

2. Показано, что предложенный подход обеспечивает согласование разнородных экспериментальных серий (в том числе при различной длине записи и наличии участков малых токов и выбросов) за счет введения порога отсечения, клиппирования и опциональных процедур робастификации (винзоризации, сглаживания, обрезки хвоста).

3. Метод апробирован на элементах разных форм-факторов и электрохимических систем (LIR2032 и NCR18650B), а также на группе глубоко деградировавших образцов NCR18650B (остаточная емкость < 20 %). Установлено, что

усредненные тренды чувствительны к изменению состояния и отражают деградационные различия по уровню и форме кривых, что делает их пригодной основой для последующего построения диагностических признаков и анализа деградации по SOH.

Таким образом, предложенная процедура формирует унифицированное и сопоставимое представление импедансных данных, пригодное для дальнейшего выявления закономерностей старения и разработки моделей оценивания состояния аккумуляторов. Возможные направления развития связаны с расширением набора формируемых признаков на основе $Z(p)$, количественной оценкой чувствительности к режимам и температуре, а также интеграцией метода в контур мониторинга BMS.

Список литературы

1. Li X., Yao L., Hui D. Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations // J. of Modern Power Syst. and Clean Energy. 2016. Vol. 4. P. 593–603. doi: 10.1007/s40565-016-0247-y.

2. Aging and post-aging thermal safety of lithiumion batteries under complex operating conditions: A comprehensive review / Z. Wang, Q. Zhao, S. Wang, Y. Song, B. Shi, J. He // J. of Power Sources. 2024. Vol. 623. Art. 235453. doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.235453.

3. Барсегян К. Р. Эквивалентная динамическая модель литий-ионных аккумуляторов // Студенческий науч.-образов. журн. «StudNet». 2021. № 7. С. 597–604.

4. Кокорин А. Н., Шишко В. С. Аспекты безопасности литий-ионного аккумулятора // Сб. мат. XXIII междунар. науч.-практ. конф. «Решетневские чтения», посвящ. памяти ген. конструктора ракетно-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева: в 2 ч. Ч. 1. Красноярск: СибГУНиТ им. акад. М. Ф. Решетнева, 2019. С. 350–352.

5. Huet F. A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries // J. of Power Sources. 1998. Vol. 70, no. 1. P. 59–69. doi: 10.1016/S0378-7753(97)02665-7.

6. Спектроскопия электрохимического импеданса литиевых источников тока / А. Г. Попов, Н. В. Еремин, Н. А. Мозговой, В. А. Пиджаков // Тр. МФТИ. 2022. Т. 14, № 1(53). С. 78–87. doi: 10.53815/20726759_2022_14_1_78.

7. Waag W., Käbitz S., Sauer D. U. Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application // Appl. Energy. 2013. Vol. 102. P. 885–897. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.09.030.

8. Амелина М. А., Амелин С. А. Построение непрерывных моделей импульсных преобразователей постоянного напряжения // Практическая силовая электроника. 2019. № 3(75). С. 20–28.

9. Sihvo J., Stroe D.-I. Real-time impedance monitoring of Li-ion batteries under dynamic operating conditions using the discrete Fourier transform eigenvector approach // Cell Reports Phys. Sci. 2025. Vol. 6, no. 4. Art. 102512. doi: 10.1016/j.xcrp.2025.102512.

10. Li H., Lyu Z., Han M. Robust and fast estimation of equivalent circuit model from noisy electrochemical impedance spectra // Electrochimica Acta. 2022. Vol. 422, no. 2. Art. 140474. doi: 10.1016/j.electacta.2022.140474.

11. Aldrini J., Chihi I. Adaptive multi-scale threshold with time-gated evaluation for real-time Fault detection in non-stationary and high-dynamic industrial cyber-physical systems // J. of Intelligent Manufacturing. 2026. P. 1–24. doi: 10.1007/s10845-026-02809-3.

12. Impedance change and capacity fade of lithium nickel manganese cobalt oxide-based batteries during calendar aging / J. Schmitt, A. Maheshwari, M. Heck, S. Lux, M. Vetter // J. of Power Sources. 2017. Vol. 353. P. 183–194. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.090.

Информация об авторах

Си Чжэньчао – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: xizhenchao@foxmail.com
https://orcid.org/0009-0003-6738-3528

Константинов Константин Витальевич – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: const.festu@mail.ru

References

1. Li X., Yao L., Hui D. Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations // J. of Modern Power Syst. and Clean Energy. 2016. Vol. 4. P. 593–603. doi: 10.1007/s40565-016-0247-y.

2. Aging and post-aging thermal safety of lithiumion batteries under complex operating conditions: A comprehensive review / Z. Wang, Q. Zhao, S. Wang, Y. Song, B. Shi, J. He // J. of Power Sources. 2024. Vol. 623. Art. 235453. doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.235453.

3. Barsegjan K. R. Jekvivalentnaja dinamicheskaja model' litijionnyh akkumuljatorov // Studencheskij nauch.-obrazov. zhurn. «StudNet». 2021. № 7. S. 597–604. (In Russ.).

4. Kokorin A. N., Shishko V. S. Aspekty bezopasnosti litij-ionnogo akkumuljatora // Sb. mat. XXIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Reshetnevskie chtenija», posvjashh. pamjati gen. konstruktora raketno-kosmich. sistem akad. M. F. Reshetneva: v 2 ch. Ch. 1. Krasnojarsk: SibGUNiT im. akad. M. F. Reshetneva, 2019. S. 350–352. (In Russ.).

5. Huet F. A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries // J. of Power Sources. 1998. Vol. 70, no. 1. P. 59–69. doi: 10.1016/S0378-7753(97)02665-7.

6. Spektroskopija jelektrohimicheskogo impedansa litievyh istochnikov toka / A. G. Popov, N. V. Erjomin, N. A. Mozgovoj, V. A. Pidzhakov // Tr. MFTI. 2022. T. 14, № 1(53). S. 78–87. doi: 10.53815/20726759_2022_14_1_78. (In Russ.).

7. Waag W., Käbitz S., Sauer D. U. Experimental investigation of the lithiumion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application // Appl. Energy. 2013. Vol. 102. P. 885–897. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.09.030.

8. Amelina M. A., Amelin S. A. Postroenie nepreryvnyh modelej impul'snyh preobrazovatelej postojannogo naprjazhenija // Prakticheskaja silovaja jelektronika. 2019. № 3(75). S. 20–28. (In Russ.).

9. Sihvo J., Stroe D.-I. Real-time impedance monitoring of Li-ion batteries under dynamic operating conditions using the discrete Fourier transform eigenvector approach // Cell Reports Phys. Sci. 2025. Vol. 6, no. 4. Art. 102512. doi: 10.1016/j.xcrp.2025.102512.

10. Li H., Lyu Z., Han M. Robust and fast estimation of equivalent circuit model from noisy electrochemical impedance spectra // Electrochimica Acta. 2022. Vol. 422, no. 2. Art. 140474. doi: 10.1016/j.electacta.2022.140474.

11. Aldrini J., Chihi I. Adaptive multi-scale threshold with time-gated evaluation for real-time fault detection in non-stationary and high-dynamic industrial cyber-physical systems // J. of Intelligent Manufacturing. 2026. P. 1–24. doi: 10.1007/s10845-026-02809-3.

12. Impedance change and capacity fade of lithium nickel manganese cobalt oxide-based batteries during calendar aging / J. Schmitt, A. Maheshwari, M. Heck, S. Lux, M. Vetter // J. of Power Sources. 2017. Vol. 353. P. 183–194. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.090.

Information about the authors

Xi Zhenchao – postgraduate student, Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: xizhenchao@foxmail.com
https://orcid.org/0009-0003-6738-3528

Konstantin V. Konstantinov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: const.festu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; принята к публикации после рецензирования 27.08.2026; опубликована онлайн 27.11.2026.

Submitted 10.04.2026; accepted 27.08.2026; published online 27.11.2026.