

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.355

doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-29-38

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА В СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА

Гор Юрийевич Давоян^{1✉}, Кирилл Михайлович Сидоров²

^{1,2} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия

¹ gor.davoyan99@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3289-8115>

² k.sidorov@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8625-3065>

Аннотация. *Описана математическая модель литий-ионного аккумулятора, основанная на уравнении Шеферда, а также представлены результаты её валидации. Описана методика расчета коэффициентов уравнения и представлены результаты проведенных экспериментальных исследований. Проведены корректировки коэффициентов как для разрядных, так и зарядных характеристик аккумулятора. Произведена оценка пределов применимости описанного метода и обозначены шаги по дальнейшему улучшению и масштабированию модели. Целью исследования является формирование имитационной математической модели литий-ионного аккумулятора с дальнейшей валидацией по экспериментальным данным, полученным при испытаниях аккумулятора электромобиля на разрядно-зарядном стенде. Математическая модель аккумулятора позволит разработчикам проводить расчетные исследования и анализ систем электрифицированного транспорта на стадии проектирования. Имитационная математическая модель создана с применением компьютерного программного комплекса MATLAB&Simulink. Экспериментальные исследования проведены с помощью измерительного стенда для снятия разрядно-зарядных характеристик аккумулятора. Новизна работы заключается в использовании комбинированного метода моделирования аккумулятора на основе уравнения Шеферда с дополнительной корректировкой коэффициентов для лучшей сходимости расчетных и экспериментальных данных. Полученные результаты сходимости описанного метода и эксперимента (среднеквадратичное отклонение < 0,02В) свидетельствуют о высокой проработанности модели и правильно подобранных методиках расчета. Представленное математическое уравнение зависимости напряжения литий-ионного аккумулятора с известными характеристиками от тока и методика расчета коэффициентов этого уравнения могут быть полезны инженерам и разработчикам, специализирующимся на моделировании аккумуляторных батарей различного применения. Поскольку классическое уравнение Шеферда не учитывает температурные влияния, изменение внутреннего сопротивления и иных параметров аккумулятора в процессе разряда и заряда, то разрабатываемая математическая модель требует индивидуального подхода к определенному типу аккумулятора, что выражается в корректировке коэффициентов уравнения и его модификациях. Представленная математическая модель аккумулятора с расчетными коэффициентами является удобной и достаточно точной основой для имитации работы литий-ионного аккумулятора в стационарных режимах работы.*

Ключевые слова: аккумулятор, математическая модель, валидация, уравнение Шеферда, стационарный режим работы

Для цитирования: Давоян Г.Ю., Сидоров К.М. Математическое моделирование литий-ионного аккумулятора в стационарных режимах заряда и разряда // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2026. №1 (31). С. 29-38. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-29-38.

Original article

Open Access Article

MATHEMATICAL MODELLING OF A LITHIUM-ION BATTERY IN STEADY-STATE CHARGE AND DISCHARGE MODES

Gor Yu. Davoyan^{1✉}, Kirill M. Sidorov²

^{1,2} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ gor.davoyan99@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3289-8115>

² k.sidorov@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8625-3065>

Abstract. *This paper describes a mathematical model of a lithium-ion battery based on the Shepherd equation, and presents the results of its validation; describes a methodology for calculating the equation coefficients, and presents the results of experimental studies; provides coefficient adjustments for both the discharge and charge characteristics of the batteries. The work outlines the applicability limits of the described methods, and steps to ensure sustainability and scalability models. The aim of this study is to develop a simulation mathematical model of a lithium-ion battery, followed by verification using experimental data obtained during electric vehicle battery testing on a discharge-charge bench. A*

mathematical model of a battery will enable developers to conduct computational studies and analyse electric vehicle systems at the design stage. The simulation model is created using the MATLAB & Simulink software suite. Experimental studies are conducted using a measuring rig to record the discharge and charge characteristics of batteries. The novelty of this work lies in using a combined calculation method based on the Shepherd equation with additional coefficient adjustments to improve the convergence of the calculated and experimental data. The obtained results of convergence between the described method and the experiment (standard deviation $< 0.02 V$) indicate the high level of the model development and the appropriately selected calculation methods. The presented mathematical equation for the voltage dependence of a lithium-ion battery with known current characteristics on the current and the methods for calculating the coefficients of this equation can be used by engineers and developers specializing in modelling AC batteries of different application. Since the classical Shepherd equation does not account for temperature limitations, changes in internal resistance, and other battery parameters during discharge and charge, the developed mathematical model requires individual approaches to a battery type, which is expressed in correcting coefficient equation and its modifications. The presented mathematical battery model with calculated coefficients is convenient and sufficiently accurate basis for simulating lithium-ion battery operation in steady-state operating modes.

Keywords: battery, mathematical model, validation, Shepherd equation, steady-state operating mode

For citation: Davoyan G.Yu., Sidorov K.M. Mathematical Modelling of a Lithium-Ion Battery in Steady-State Charge and Discharge Modes. Automation and modeling in design and management, 2026, no. 1 (31). pp. 29-38. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-29-38.

Введение

В настоящее время автотранспортный комплекс является одним из ключевых потребителей углеводородного топлива и по праву считается основным загрязнителем атмосферы. Решение данных проблем может заключаться во внедрении перспективных транспортных средств (ТС) с электрическим приводом – электромобилей (ЭМ). Они являются более энергоэффективными транспортными средствами в сравнении с автомобилями традиционной конструкции, а также способны внести вклад в снижение потребления углеводородного топлива и улучшение экологической обстановки в крупных городах и мегаполисах.

В мегаполисах России активно развивается автономный электрический транспорт для внутригородских пассажирских перевозок. Так, например, применительно к городу Москве количество электробусов за 2024 и 2025 годы увеличилось на 1200 машин нового поколения – до 2400 штук, ежедневно электробусы обеспечивают работу свыше 220 маршрутов [1]. Критически важным вопросом для любого электротранспорта является эффективное использование ресурса тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ), поскольку аккумулятор – одна из самых дорогих и уязвимых частей электромобиля и от его характеристик зависит не только запас хода, но и безопасность, надежность и срок службы всего транспортного средства.

Так как процесс снижения ресурса ТАБ измеряется годами, то для прогнозирования остаточного ресурса используются имитационные математические модели, которые полностью описывают характеристики и режимы работы реального аккумулятора и позволяют воспроизводить необходимые условия эксплуатации ТАБ.

В статье представлено описание математической модели аккумулятора электромобиля, созданной на основе уравнения Шеферда; представлена методика расчета и корректировки коэффициентов этого уравнения, а также описана методика и показаны результаты верификации и валидации разработанной модели в стационарных режимах разряда и заряда.

Обзор существующих моделей аккумулятора

Математическая модель аккумулятора – это совокупность аналитических уравнений, описывающих протекающие электрические, химические, физические и термические процессы в нем. В большинстве своем модели делятся на три основных типа.

1. Эмпирические модели. Основаны на экспериментальных данных. Примеры: модель Шеферда (*Shepherd*) [2], модель Трембле-Дессен (*Tremblay and Dessaint*) [3], модель Тевенина (*Thevenin*) [4], модель RC-цепей [5 – 7]. Основное преимущество заключается в возможности применения в системах управления батареями из-за низких вычислительных затрат и простоты в реализации, при этом обеспечивая возможность прогноза состояния аккумулятора с заданной точностью.

2. Полуаналитические и физико-химические модели. Учитывают электрохимические реакции, диффузию лития, тепловыделение и деградацию. Являются более точными, но требуют мощных вычислительных ресурсов. К наиболее известному примеру такого решения можно отнести модель Дойла-Фуллера-Ньюмана (*Doyle-Fuller-Newman*) [8].

3. Модели на основе машинного обучения. Используют методы искусственного интеллекта для предсказания функционирования аккумулятора на основе больших объемов данных эксплуатации. Подобные модели освещены в работах [9 – 11].

По способам обработки данных, методы расчета ТАБ можно разделить на две группы. Наиболее распространенные – это аналитические, построенные на подборе математического выражения, аппроксимирующего экспериментальные данные. Вторую группу представляют методы, построенные на обработке массивов экспериментальных данных, что удобно при моделировании работы ЭМ с помощью электронных вычислительных машин и может использоваться в микропроцессорных системах управления батарейными модулями.

Уравнение Шеферда для разрядных и зарядных характеристик аккумулятора

Наиболее известным и широко распространенным является метод аналитического описания разрядных характеристик аккумуляторной батареи, предложенный Шефердом и модифицированный рядом авторов [3, 12]. Данный метод позволяет описать аналитическим уравнением зависимость $U = f(i, t)$ [2, 12]:

$$U = E - K \cdot \frac{Q}{Q - i \cdot t} \cdot i - R \cdot i + A \cdot e^{-B \cdot i \cdot t} - N \cdot i \cdot t,$$

где E – начальное напряжение разряда, В; K – коэффициент поляризации, Ом; R – внутреннее сопротивление элемента, Ом; Q – емкость аккумулятора, А·ч/элемент; i – ток разряда, А; t – время разряда, ч; A – амплитуда экспоненциальной зоны, В; B – обратная постоянной времени экспоненциальной зоны, $(A \cdot ч)^{-1}$; N – коэффициент дрейфа, В/(А·ч).

Данное уравнение было получено при следующих допущениях:

- 1) сопротивление электролита остается постоянным во время разряда;
- 2) элемент разряжается постоянным током;
- 3) поляризация является функцией постоянного тока.

Член уравнения $A \cdot e^{-B \cdot i \cdot t}$ введен для учета падения напряжения в начале разряда. В большинстве случаев падение напряжения происходит в очень короткое время, и этим членом пренебрегают, но для получения полной характеристики аккумулятора он необходим. Следует отметить, что существуют различные варианты реализации данного уравнения: например, показатель степени экспоненциальной составляющей $-B \cdot i \cdot t$ может иметь различную трактовку, в том числе $-B \cdot Q^{-1} \cdot i \cdot t$, предложенной в [2]. Во всех случаях используемый вариант показателя степени выбирается индивидуально по критерию лучшей сходимости результатов с начальным участком известных разрядных характеристик аккумулятора и во многом определяется конечным значением коэффициента B . Аналогичное утверждение справедливо и для зарядного режима, в котором знак перед экспоненциальной частью может быть изменен на противоположный при соответствующих значениях коэффициентов уравнения.

В работе используется следующий метод поиска коэффициентов, основанный на методике, представленной в [2] и [12]. На рис. 1 отмечены выбранные для двух кривых точки 1...8, которые были получены при умеренно низких и высоких токах i_a и i_b .

Разрядные кривые следует выбирать так, чтобы реальные токи разряда находились в диапазоне, охватываемом двумя указанными кривыми.

Восемь точек (см. рис. 1) выбираются исходя из следующих условий [12]:

$$i_b \cdot t_1 > i_b \cdot t_5; i_b \cdot t_3 = i_a \cdot t_2; i_a \cdot t_6 = i_b \cdot t_5; i_b \cdot t_8 = i_b \cdot t_7; i_b \cdot t_7 < i_b \cdot t_3; i_b \cdot t_1 < i_b \cdot t_3; i_b \cdot t_3 / i_a \cdot t_4 < 0,7.$$

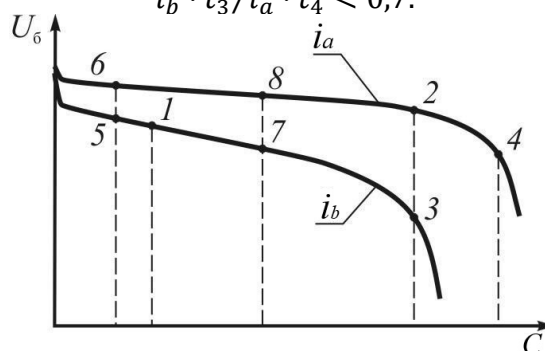


Рис. 1. Выбор точек на экспериментальных разрядных кривых при определении коэффициентов Шеферда

Fig. 1. Selection of points on experimental discharge curves when determining Shepherd coefficients

Далее составляется система уравнений, из которой определяются значения коэффициентов уравнения Шеферда. Полученные при этом выражения представлены ниже [12]. Напряжения в точках 5...8 ($U_5...U_8$) определяются следующими зависимостями:

$$\begin{cases} U_5 = E - K \cdot \frac{Q}{Q-i_b \cdot t_5} \cdot i_b - R \cdot i_b - N \cdot i_b \cdot t_5; \\ U_7 = E - K \cdot \frac{Q}{Q-i_b \cdot t_7} \cdot i_b - R \cdot i_b - N \cdot i_b \cdot t_7; \\ U_6 = E - K \cdot \frac{Q}{Q-i_a \cdot t_6} \cdot i_a - R \cdot i_a - N \cdot i_a \cdot t_6; \\ U_8 = E - K \cdot \frac{Q}{Q-i_a \cdot t_8} \cdot i_a - R \cdot i_a - N \cdot i_a \cdot t_8. \end{cases}$$

Далее, с помощью рассчитанных напряжений определяется коэффициент N :

$$N = \frac{i_b \cdot (U_6 - U_8) - i_a \cdot (U_5 - U_7)}{(i_b - i_a) \cdot i_b \cdot (t_7 - t_5)}.$$

После следующей замены переменных:

$$\begin{cases} U'_1 = U_1 + N \cdot i_b \cdot t_1; \\ U'_2 = U_2 + N \cdot i_a \cdot t_2; \\ U'_3 = U_3 + N \cdot i_b \cdot t_5; \\ U'_4 = U_4 + N \cdot i_a \cdot t_4, \end{cases}$$

можно рассчитать оставшиеся коэффициенты уравнения:

$$Q = \frac{i_a \cdot i_b^2 \cdot t_4 \cdot (U'_2 - U'_4) \cdot (t_3 - t_1) - i_b \cdot t_1 \cdot (U'_1 - U'_3) \cdot (t_4 - t_2) \cdot i_a^2}{i_b^2 \cdot (U'_2 - U'_4) \cdot (t_3 - t_1) - i_a^2 \cdot (U'_1 - U'_3) \cdot (t_4 - t_2)},$$

$$K = \frac{(U'_2 - U'_4) \cdot (Q - i_a \cdot t_4) \cdot (Q - i_a \cdot t_2)}{(t_4 - t_2) \cdot Q \cdot i_a^2},$$

$$R = \left(-K \cdot \frac{Q}{i_a - i_b} \right) \cdot \left(\frac{i_a}{Q - i_a \cdot t_2} - \frac{i_b}{Q - i_b \cdot t_1} \right) + \frac{U'_1 - U'_2}{i_a - i_b},$$

$$E = U'_1 + R \cdot i_b + \frac{K \cdot i_b \cdot Q}{Q - i_b \cdot t_1}.$$

Из формул видно, что для определения коэффициента уравнения N используются точки 5...8, а для определения коэффициентов Q , K , R , E – точки 1...4. Коэффициенты A и B уравнения определяются эмпирическим способом по экспериментально полученным разрядным характеристикам аккумулятора.

Уравнение Шеферда для аналитического определения характеристики заряда ($i < 0$) аккумулятора выглядит следующим образом:

$$U = E - K \cdot \frac{Q}{i \cdot t} \cdot i - R \cdot i + A \cdot e^{-B \cdot |i \cdot t|} - N \cdot i \cdot t.$$

Как видно, уравнение зарядной характеристики идентично уравнению разрядной характеристики, за исключением множителя $Q/i \cdot t$, на который накладываются некоторые ограничения. Для корректного расчета, в начальный момент времени ($t = 0$) этот множитель принимается равным единице. Для процесса заряда также полагается, что ток аккумулятора принимает отрицательные значения. Коэффициенты, фигурирующие в этом уравнении, те же, что и в уравнении разрядной характеристики, и для одного и того же аккумулятора одинаковы.

Результаты экспериментальных исследований аккумулятора

В рамках работы были проведены экспериментальные исследования литий-ионного аккумулятора. Основные характеристики исследуемого аккумулятора:

- тип – на основе комбинированного катодного материала ($NMC+LMO$);
- номинальная ёмкость – 40 А·ч;
- номинальное напряжение – 3,75 В;
- рабочее напряжение – 3,0...4,2 В;

- номинальный ток заряда/разряда – 20 А / 20 А;
- максимальный ток заряда/разряда – 80 А / 200 А;
- пиковый ток разряда – 240 А в течение 10 секунд;
- внутреннее сопротивление – не более 2,0 мОм;
- рабочая температура – от -20 до +55 °С;
- масса – не более 950 г.

Согласно описанной методике, для определения коэффициентов уравнения Шеффера для выбранного аккумулятора необходимо, как минимум, две вольт-амперные характеристики $U=f(I_p, t)$. Разрядные характеристики аккумулятора при токах 20 и 40 А, полученные в ходе экспериментальных исследований, представлены на рис. 2. Здесь и далее $C = \int idt$ – извлечённая (в режиме разряда) или полученная (в режиме заряда) ёмкость аккумулятора, А·ч.

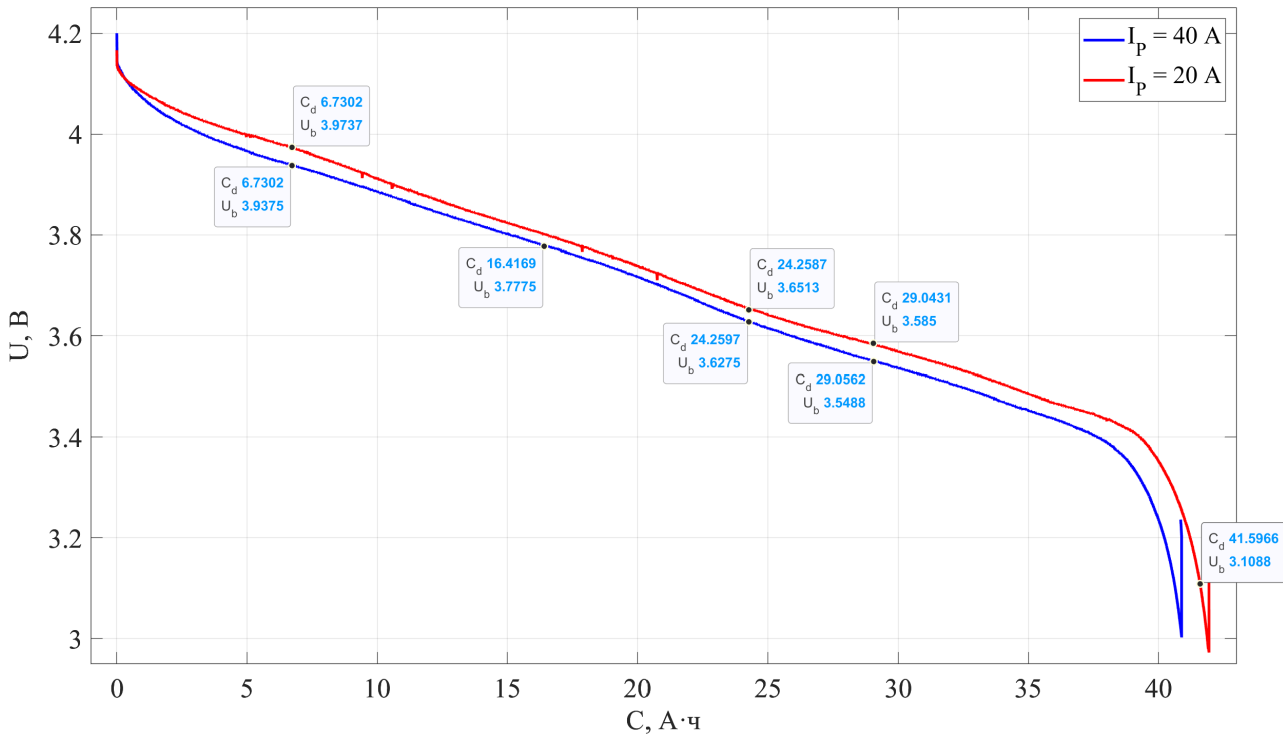


Рис. 2. Разрядные характеристики аккумулятора при токе разряда 20 и 40 А
Fig. 2. Battery discharge characteristics at discharge currents of 20 and 40 A

На полученных разрядных характеристиках аккумулятора были определены 8 контрольных точек, координаты которых приведены в табл. 1.

Таблица 1
 Table 1

Экспериментальные точки для определения коэффициентов уравнения Шеффера
Experimental points for determining the coefficients of the Shepherd equation

№	C, А·ч	U, В
1	16,4169	3,7775
2	29,0431	3,5850
3	29,0562	3,5488
4	41,5966	3,1088
5	6,7302	3,9375
6	6,7302	3,9737
7	24,2597	3,6275
8	24,2587	3,6513

После произведения расчетов согласно описанной методике были получены следующие коэффициенты уравнения Шеффера: $Q = 41,45$ А·ч; $N = 0,01657$ В/(А·ч); $K = 0,003$ Ом;

$R = 0,001026 \text{ Ом}$; $E = 4,1191 \text{ В}$. Также с помощью полученных зависимостей были определены коэффициенты экспоненциальной части разрядной характеристики: $A = 0,1 \text{ В}$; $B = 1$.

Помимо разрядных характеристик в ходе экспериментальных исследований были получены зарядные характеристики аккумулятора, в том числе для номинального тока 20 А. Зарядная характеристика представлена на рис. 3.

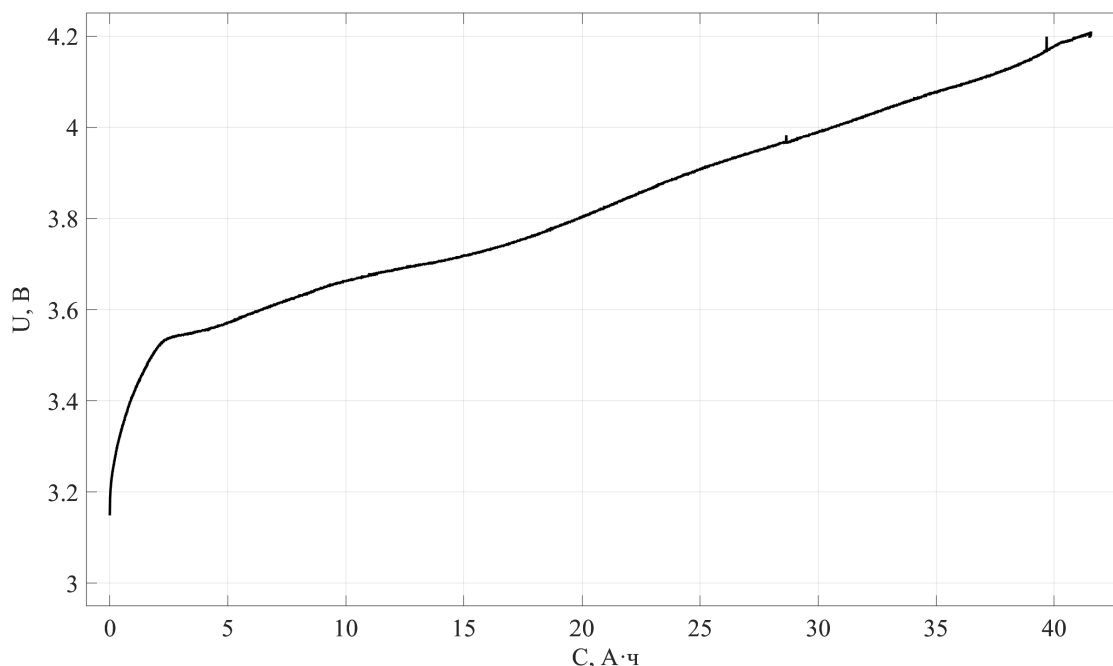


Рис. 3. Зарядная характеристика аккумулятора при токе заряда 20 А
 Fig. 3. Charging characteristic of the battery obtained during the experiment

Математическая модель аккумулятора

С использованием выражений для расчета напряжения аккумулятора в процессе заряда и разряда в специализированной среде компьютерного моделирования *MATLAB&Simulink* сформирована математическая модель аккумулятора, функциональная схема которой приведена на рис. 4. Модель представляет собой схему замещения, состоящую из: регулируемого источника ЭДС; задатчика напряжения, реализующего зависимость уравнения Шеферда для зарядно-разрядных характеристик; резистора, имитирующего внутреннее сопротивление аккумулятора и датчика тока. К клеммам «+» и «-» подключается нагрузка.

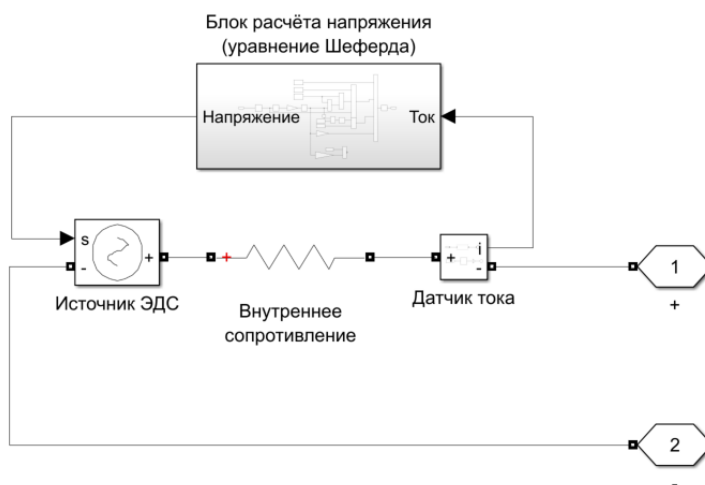


Рис. 4. Функциональная схема математической (компьютерной) модели аккумулятора
 Fig. 4. Functional diagram of the mathematical (computer) model of the battery cell

В блоке расчёта напряжения реализовано уравнение Шеферда для разрядных и зарядных характеристик аккумулятора. Отличие состоит только в том, что этот блок не учитывает падение напряжения на внутреннем сопротивлении аккумулятора, поскольку оно уже учтено в электрической цепи.

Результаты валидации математической модели

После проведения экспериментальных исследований было проведено сопоставление полученных результатов с расчетными. Результаты валидации математической модели аккумулятора в стационарном режиме разряда и заряда для тока 20 А представлены на рис. 5, 6.

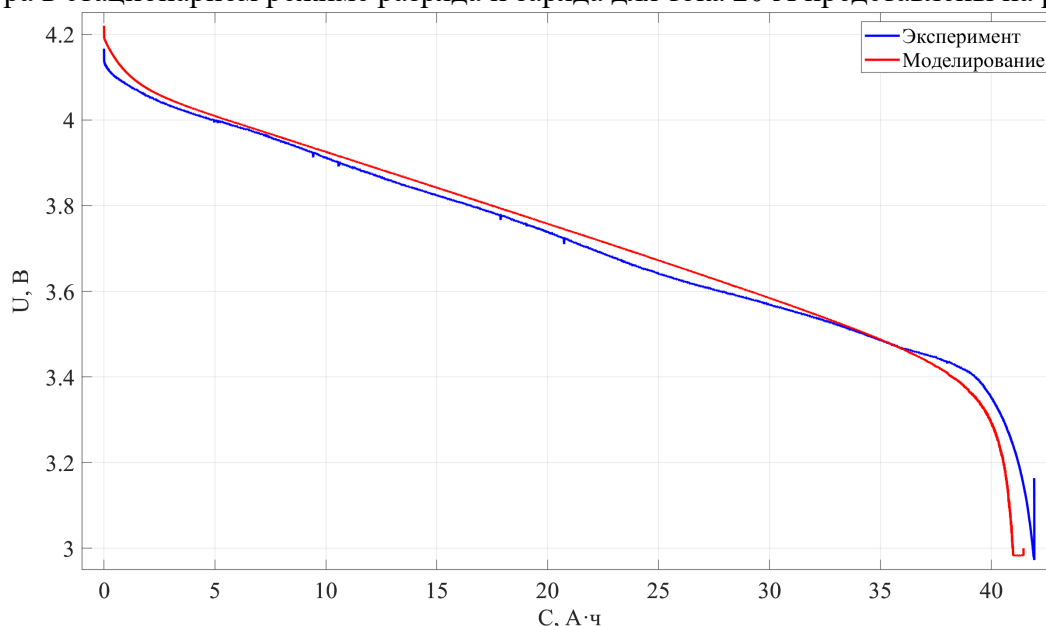


Рис. 5. Результаты валидации математической модели аккумулятора в стационарном режиме разряда
Fig. 5. Results of validation of the mathematical model of the battery in the steady-state discharge mode

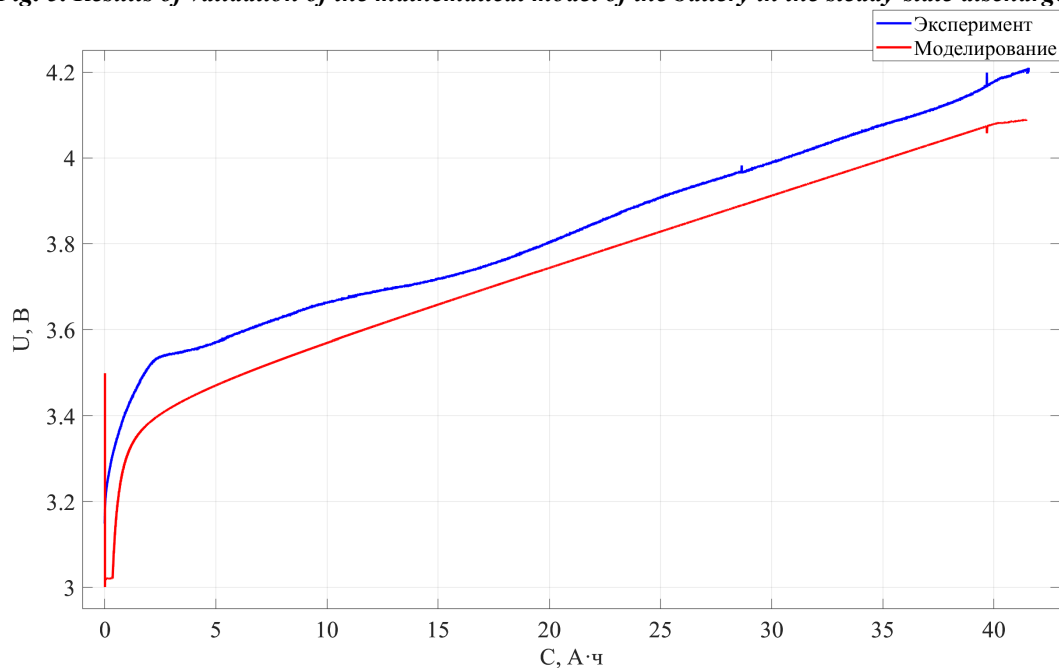


Рис. 6. Результаты валидации математической модели аккумулятора в стационарном режиме заряда
Fig. 6. Results of validation of the mathematical model of the battery in the steady-state charging mode

Как видно из рисунков, результаты моделирования не совпадают с полученными данными из эксперимента. Это подтверждает расчет среднеквадратичного отклонения (СКО): $\sigma > 0,06$ В, что составляет 5 % от рабочего диапазона напряжения (3,0...4,2 В). Следовательно,

коэффициенты уравнения Шеферда, полученные расчетным методом, необходимо скорректировать. Несовпадение экспериментальных данных и результатов моделирования связано с основными недостатками метода Шеферда: не учитывается изменение внутреннего сопротивления аккумулятора в процессе разряда и заряда, не учитывается воздействие температуры и влияние деградации аккумуляторной ячейки на её параметры.

В результате корректировки были получены следующие коэффициенты:

– для характеристики разряда: $Q = 41,45 \text{ А}\cdot\text{ч}$; $N = 0,016 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{ч})$; $K = 0,0002 \text{ Ом}$; $R = 0,0011425 \text{ Ом}$; $E = 4,1 \text{ В}$; $A = 0,1 \text{ В}$; $B = 1 (\text{А}\cdot\text{ч})^{-1}$;

– для характеристики заряда: $Q = 41,45 \text{ А}\cdot\text{ч}$; $N = 0,016 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{ч})$; $K = 0,0002 \text{ Ом}$; $R = 0,0011425 \text{ Ом}$; $E = 3,5 \text{ В}$; $A = 0,1 \text{ В}$; $B = 1 (\text{А}\cdot\text{ч})^{-1}$.

Результаты валидации математической модели со скорректированными коэффициентами уравнения Шеферда, представлены на рис. 7 – 9.

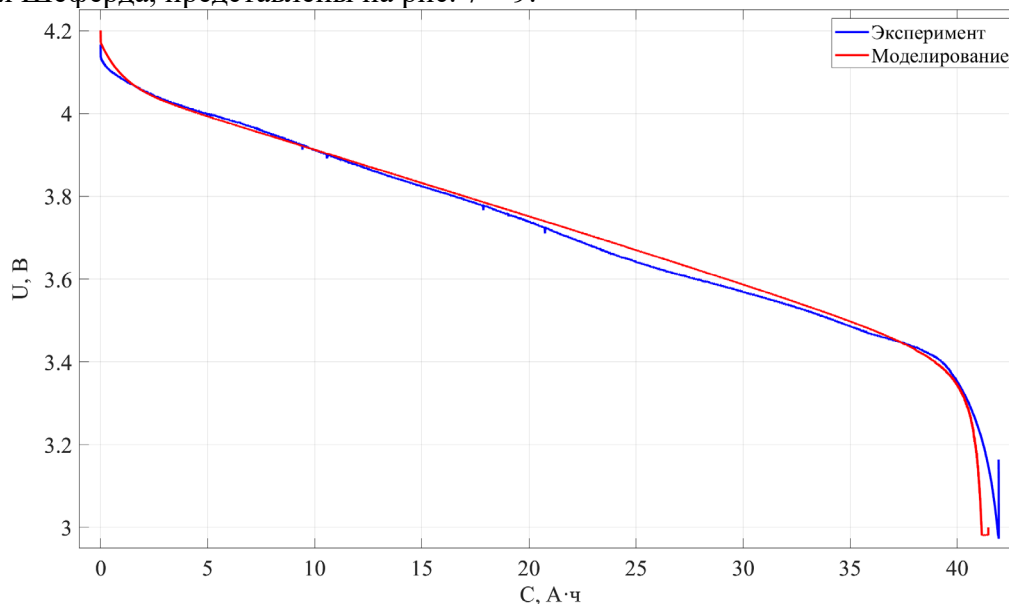


Рис. 7. Сравнение результатов эксперимента и моделирования при токе разряда 20 А после корректировки коэффициентов

Fig. 7. Comparison of experimental and simulation results at a discharge current of 20 A after adjusting the coefficients

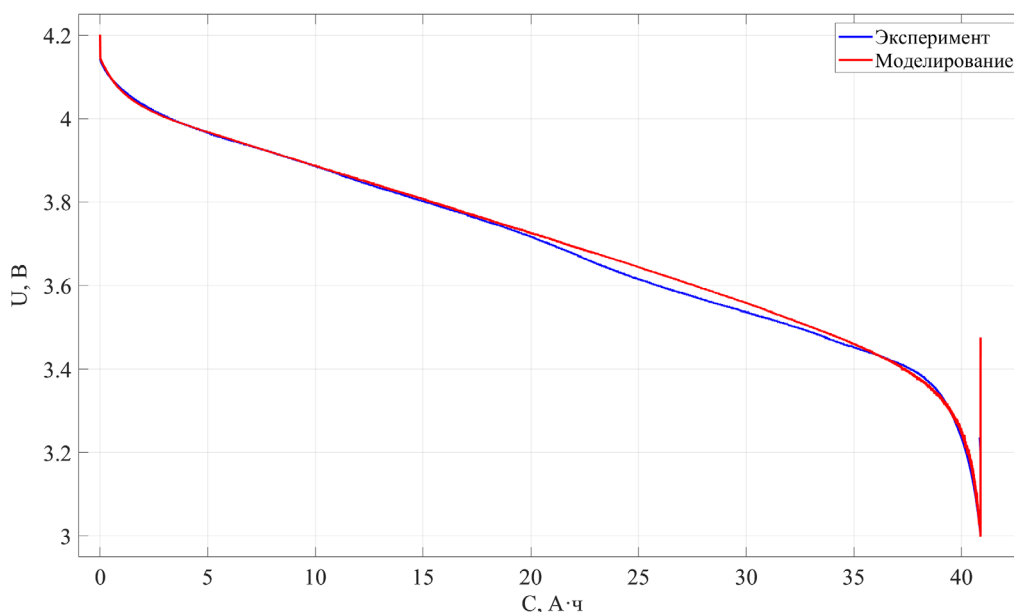


Рис. 8. Сравнение результатов эксперимента и моделирования при токе разряда 40 А после корректировки коэффициентов

Fig. 8. Comparison of experimental and simulation results at a discharge current of 40 A after adjusting the coefficients

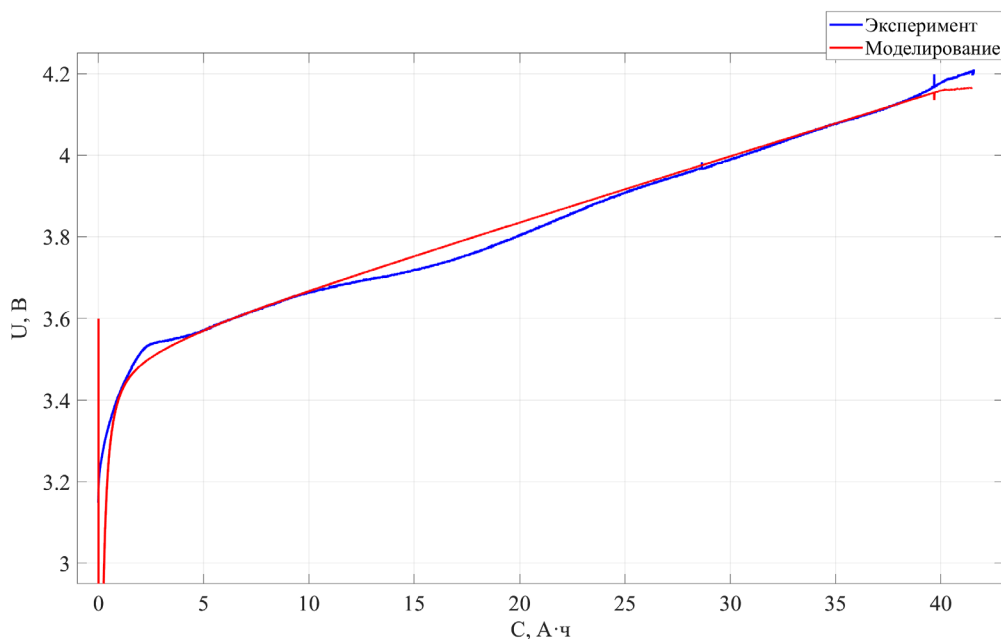


Рис. 9. Сравнение результатов эксперимента и моделирования при токе заряда 20 А после корректировки коэффициентов

Fig. 9. Comparison of experimental and simulation results at a charging current of 20 A after adjusting the coefficients

Как видно из представленных рисунков, сходимость результатов экспериментальных исследований и математического моделирования после корректировки коэффициентов уравнения Шеферда значительно улучшилась. Подтверждением этому является уменьшенное втрое значение СКО, которое не превышает 0,02 В, что составляет 1,67 % от рабочего диапазона напряжения аккумулятора.

Выводы

1. Уравнение Шеферда является удобной и достаточно точной основой для моделирования литий-ионного аккумулятора в стационарных режимах разряда и заряда при условии корректной идентификации параметров по экспериментальным данным.

2. Описанная методика выбора двух разрядных кривых и восьми контрольных точек позволяет получить начальные оценки необходимых коэффициентов уравнения, однако для достижения точности, требуемой в практических задачах, необходима последующая корректировка параметров (дополнительный расчет по кривым и учёт экспериментальных погрешностей).

3. Реализованная математическая модель показала хорошие результаты валидации: после корректировки некоторых коэффициентов значение СКО не превышает 0,02 В, что соответствует 1,67 % от рабочего диапазона напряжения аккумулятора.

4. Результаты проведенных исследований могут быть положены в основу дальнейшего изучения данного метода математического моделирования и разработок в этой области. В первую очередь необходимо валидировать разработанную имитационную модель в динамических режимах эксплуатации аккумулятора и при различных температурах окружающей среды.

Список источников:

1. С начала года в Москве появилось 44 электро-бусных маршрута // mos.ru. URL: <https://www.mos.ru/news/item/158781073/> (дата обращения: 25.10.2025).
2. Shepherd C.M. Design of Primary and Secondary Cells. II. An Equation Describing Battery Discharge // Journal of The Electrochemical Society. – 1965. – Vol. 112, № 7. – P. 657–664.
3. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application // World Electric Vehicle Journal. – 2009. – Vol. 3. – № 2. – P. 289-298.

References:

1. Mos.ru [Internet]. Since the Beginning of the Year, 44 Electric Bus Routes Have Appeared in Moscow. 2025 Aug 27 [cited 2025 Oct 25]. Available from: <https://www.mos.ru/news/item/158781073/>
2. Shepherd C.M. Design of Primary and Secondary Cells. II. An Equation Describing Battery Discharge. Journal of The Electrochemical Society. 1965;112(7):657-664.
3. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Application. World Electric Vehicle Journal. 2009;3(2):289-298.

4. Farmann A., Sauer D.U. A comprehensive review of on-board State-of-Charge estimation techniques for lithium-ion batteries in electric vehicles // *Journal of Power Sources*. – 2016. – Vol. 281. – P. 114-130.
5. An adaptive model for state of charge estimation of lithium-ion batteries using a mixture of Gaussian process models / Wei Z., Tseng K. J., Wai N. et al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2017. – Vol. 64, - iss. 4. – P. 3254-3263.
6. Development of a modular three-dimensional finite-element flow model for lithium-ion batteries / Ecker M., Gerschler J.B., Vogel U. et al. // *Journal of Power Sources*. – 2012. – Vol. 205. – P. 306-319.
7. A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit model structures for Li-ion batteries / Nejad S., et al. // *Journal of Power Sources*. – Vol. 316. – P. 183-196.
8. Doyle M., Fuller T.F., Newman J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1993. – Vol. 140. – № 6. – P. 1526-1533.
9. Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation / Severson K.A., Attia P.M., Jin N., et al. // *Nature Energy*. – 2019. – Vol. 4. – № 5. – P. 383-391.
10. Data-driven based state of charge estimation for lithium-ion batteries using artificial neural networks / Li Y., Liu K., Foley A. et al. // *Journal of Power Sources*. – 2020. – Vol. 450. – Art. 227586.
11. State-of-charge estimation using deep learning: A method for reconfiguring voltage, current and temperature measurements / Chemali E., Kollmeyer P.J., Preindl M. et al. // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2018. – Vol. 67. – iss. 10. – P. 9484-9493.
12. Иоанесян А.В. Моделирование нестационарных режимов работы аккумуляторной батареи электромобиля: дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. (05.09.03 – электротехнические комплексы и системы) / А.В. Иоанесян; рук. работы В.Е. Ютт. – М.: МАДИ (ГТУ), 2009.
4. Farmann A., Sauer D.U. A Comprehensive Review of On-Board State-of-Charge Estimation Techniques for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*. 2016;281:114-130.
5. Wei Z, Tseng KJ, Wai N, et al. An Adaptive Model for State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Using a Mixture of Gaussian Process Models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017;64(4):3254-3263.
6. Ecker M, Gerschler JB, Vogel U, et al. Development of a Modular Three-Dimensional Finite-Element Flow Model for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*. 2012;205:306-319.
7. Nejad S., et al. A Systematic Review of Lumped-Parameter Equivalent Circuit Model Structures for Li-ion Batteries. *Journal of Power Sources*. 2016;316:183-196.
8. Doyle M., Fuller T.F., Newman J. Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell. *Journal of The Electrochemical Society*. 1993;140(6):1526-1533.
9. Severson KA, Attia PM, Jin N, et al. Data-Driven Prediction of Battery Cycle Life Before Capacity Degradation. *Nature Energy*. 2019;4(5):383-391.
10. Li Y, Liu K, Foley A, et al. Data-driven Based State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Artificial Neural Networks. *Journal of Power Sources*. 2020;450:227586.
11. Chemali E, Kollmeyer PJ, Preindl M, et al. State-of-Charge Estimation Using Deep Learning: A Method for Reconfiguring Voltage, Current and Temperature Measurements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018;67(10):9484-9493.
12. Ioanesyan A.V. Modelling of Non-Stationary Operating Modes of an Electric Vehicle Battery. Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: MADI (STU); 2009.

Информация об авторах:

Давоян Гор Юрьевич

аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Author-ID-РИНЦ 1159493, ORCID 0009-0004-3289-8115.

Сидоров Кирилл Михайлович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Scopus-Author ID 56982744600, Author-ID-РИНЦ 552039, ORCID 0000-0001-8625-3065

Information about the authors:

Davoyan Gor Yurievich

Postgraduate Student of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), RSCI Author-ID: 1159493, ORCID: 0009-0004-3289-8115.

Sidorov Kirill Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Equipment of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Scopus-Author ID: 56982744600, RSCI Author-ID: 552039, ORCID: 0000-0001-8625-3065

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.11.2025; одобрена после рецензирования 14.12.2025; принята к публикации 21.12.2025.

The article was submitted 24.11.2025; approved after reviewing 14.12.2025; accepted for publication 21.12.2025.

Рецензент – Бутарев И.Ю., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Butarev I.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.