

УДК 621.355: 519.713
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5311
Шифр специальности ВАК: 2.4.2, 2.4.1
Научная статья



Модель напряжения литий-ионного аккумулятора для задачи прогнозирования предаварийного состояния

В.Г. Букреев, Х.Х.Ш. Ле Жа✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉sonsevas98@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В настоящее время человечество сталкивается с рядом экологических вызовов, среди которых наибольшее значение имеет изменение климата. Основным фактором климатических изменений является глобальное потепление, вызванное значительными выбросами парниковых газов. Одним из ключевых направлений решения данной проблемы является внедрение возобновляемых источников энергии. Однако нестабильность их работы обуславливает необходимость использования систем накопления электроэнергии для обеспечения бесперебойного электропитания потребителей. В этом контексте литий-ионные аккумуляторы являются одними из наиболее перспективных устройств накопления электроэнергии благодаря высокой удельной энергии, ресурсу и эффективности. Однако в процессе эксплуатации литий-ионные аккумуляторы подвержены риску теплового разгона – трудно предсказуемого явления, способного привести к аварийным последствиям. Поэтому задача своевременного прогнозирования предаварийного состояния литий-ионных аккумуляторов становится крайне актуальной с точки зрения обеспечения безопасности. Прямые экспериментальные исследования аварийных состояний сопряжены с высокими затратами и техническими сложностями, поскольку аккумуляторы после теплового разгона, как правило, становятся непригодными для дальнейшей эксплуатации. Это определяет практическую значимость разработки модели напряжения аккумулятора для оценки его предаварийного состояния. **Цель** данной работы заключается в разработке модели напряжения литий-ионных аккумуляторов в предаварийном состоянии, возникающем, например, при режиме перезаряда. **Методы.** Опубликованные данные напряжения аккумулятора в предаварийном режиме, математические методы для аппроксимации характеристик и построения соответствующей динамической модели напряжения литий-ионных аккумуляторов. **Результаты и выводы.** Разработанная модель достаточно адекватно характеризует динамику изменения напряжения аккумулятора в режиме перезаряда. При сравнении с эталонной моделью максимальная погрешность уточненной модели составляет примерно 6,5 %, а средняя относительная погрешность – 0,6 %, что подтверждает эффективность предложенного подхода для использования в задаче прогнозирования.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, предаварийное состояние, признаки предаварийного состояния, модель напряжения аккумулятора, перезаряд аккумулятора

Для цитирования: Букреев В.Г., Ле Жа Х.Х.Ш. Модель напряжения литий-ионного аккумулятора для задачи прогнозирования предаварийного состояния // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 88–98. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5311

UDC 621.355: 519.713
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5311
Scientific paper



Lithium-ion battery voltage modeling for pre-failure state prediction

V.G. Bukreev, H.H.S. Le Gia✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉sonsevas98@gmail.com

Abstract. Relevance. Humanity is currently facing a number of environmental challenges, the most significant of which is climate change. The main factor driving climate change is global warming caused by substantial greenhouse gas emissions. One of the key approaches to addressing this issue is the integration of renewable energy sources. However, the intermittent nature of their operation necessitates the use of energy storage systems to ensure uninterrupted power supply for consumers. In this context, lithium-ion batteries are among the most promising energy storage devices due to their high specific energy, long cycle life, and efficiency. During operation, lithium-ion batteries are exposed to the risk of thermal runaway – a difficult-to-predict phenomenon that may lead to severe accidents. Therefore, the task of timely prediction of pre-failure states in lithium-ion batteries becomes highly relevant from the perspective of safety assurance. Direct experimental studies of failure states are associated with high costs and technical difficulties, since batteries typically become unsuitable for further use after thermal runaway. This highlights the practical significance of developing a voltage model of the battery at the pre-failure stage. **Aim.** To develop a voltage model of a lithium-ion battery in a pre-failure state arising, for example, under overcharge conditions. **Methods.** Experimental published battery voltage data in the pre-failure regime, along with mathematical and numerical methods for approximating the characteristics and constructing the corresponding dynamic voltage model of the lithium-ion batteries. **Results and conclusions.** The study demonstrates that the developed model adequately characterizes the voltage dynamics of the battery under overcharge conditions. Compared with the reference model, the maximum error of the refined model is approximately 6.5%, while the mean relative error is 0.6%, confirming the effectiveness of the proposed approach for predictive applications.

Keywords: lithium-ion battery, pre-failure state, pre-failure indicators, battery voltage model, overcharge battery

For citation: Bukreev V.G., H Le Gia.H.S. Lithium-ion battery voltage modeling for pre-failure state prediction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 88–98. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5311

Введение

Современный мир сталкивается с множеством экологических вызовов, среди которых особое значение имеет проблема глобального потепления [1, 2]. Согласно исследованиям, в 2024 г. средняя температура воздуха на планете превысила доиндустриальный уровень на 1,6 °C [3]. В рамках Парижского соглашения большинство стран сформулировали стратегическую цель – достижение углеродной нейтральности к 2060 г. путем поэтапной декарбонизации энергетического сектора [4].

Ключевым направлением для достижения данной цели является переход на использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), включая солнечную, ветровую и гидроэнергетику [5]. Согласно анализу, в период с 2000 по 2019 гг. доля ВИЭ в общем энергобалансе увеличивалась быстрее, чем у других источников, достигая темпов роста до 13,8 % [6, 7]. Однако важным недостатком ВИЭ остаётся нестабильность выработки энергии, вызванная неравномерностью энергетического потенциала во времени и пространстве. Это приводит к значительным периодам простоя оборудования и низкому коэффициенту использования установленной мощности, особенно в случае солнечных электростанций [8]. Для обеспечения стабильного и надёжного энергоснабжения всё чаще требуется создание вспомогательной инфраструктуры, в частности системы накопления электроэнергии (СНЭЭ) [9, 10]. В данном контексте особое внимание привлекают литий-ионные аккумуляторы (ЛИА), обладающие рядом преимуществ: высокой плотностью энергии, низким саморазрядом и длительным сроком службы [11, 12]. Тем не менее в процессе эксплуатации ЛИА могут подвергаться различным воздействиям, таким

как перегрев [13], перезаряд [14] и переразряд [15], что может привести к тепловому разгону, выходу из строя или даже взрыву. Точное прогнозирование теплового разгона играет ключевую роль в понимании его механизмов, совершенствовании протоколов обслуживания, что способствует более безопасной эксплуатации ЛИА. На сегодняшний день проведён ряд исследований, посвящённых анализу теплового разгона. Однако прямые экспериментальные методы сопряжены с большими финансовыми затратами и техническими сложностями, поскольку аккумуляторы, пережившие тепловой разгон, не подлежат повторному использованию, а также представляют угрозу безопасности [16].

Статья посвящена построению модели напряжения ЛИА в режиме перезаряда, предшествующего тепловому разгону. Предлагаемая модель отражает характерные изменения напряжения в предаварийном состоянии, определённые на основе анализа количественных характеристик, полученных из опубликованных результатов экспериментальных и теоретических исследований.

Анализ временной зависимости напряжения ЛИА на стадии предаварийного состояния в режиме перезаряда

На первом этапе решения данной задачи выполняется анализ изменений напряжения ЛИА в режиме перезаряда с целью выявления характерных признаков, отражающих наступление предаварийного состояния. Полученные количественные характеристики напряжения служат основой для разработки модели.

Анализ изменения характеристик аккумулятора показывает, что переход ЛИА в предаварийное со-

стояние при перезаряде имеет поэтапный характер. Далее приведены результаты ряда работ, посвящённых данной проблеме.

В публикации [17] исследовалось состояние призматических литий-железо-фосфатных аккумуляторов номинальной ёмкостью 40 А·ч. Выделяются пять характерных стадий перезаряда, отмеченных на графике (рис. 1) шестью точками. Анализ изменения напряжения аккумулятора показал, что на первой стадии (с точки U_0 до $U_{пл}$) начинается динамичное возрастание напряжения. Данная стадия начинается в момент времени примерно при $t = 3030$ с. и напряжении 3,65 В. Увеличение напряжения продолжается до момента времени $t \approx 3126$ с., после чего напряжение стабилизируется на уровне 4,2 В и не изменяется примерно 602 с.

Далее в течение примерно 55 с. напряжение резко возрастает до уровня 4,71 В – это соответствует так называемой стадии ускорения. Затем начинается постепенное снижение напряжения до момента времени $t \approx 4389$ с. После этого наблюдается стремительное возрастание напряжения до его максимального значения $U_{\max} = 5$ В, что указывает на переход в аварийное состояние.

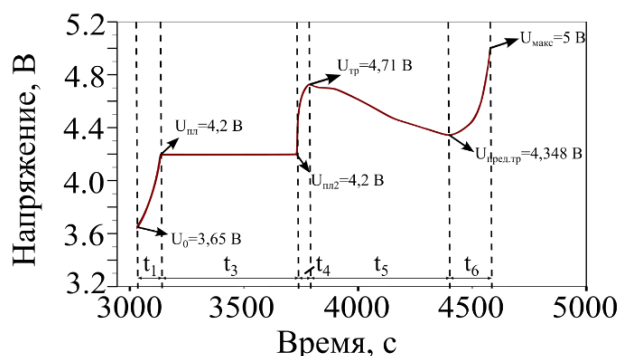


Рис 1. Профиль напряжения аккумулятора во время испытаний на перезаряд. Воспроизведено из [17]

Fig. 1. Voltage profile of the cell during overcharge testing. Reproduced from [17]

В работе [18] приведены результаты исследований и анализ теплового разгона ЛИА с различными катодными материалами в условиях перезаряда. В данной работе рассмотрены аккумуляторы с катодами на основе LiFePO_4 (LFP) и $\text{Li}[\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}]\text{O}_2$ (NCM622).

На графиках (рис. 2) зависимости напряжения от времени для всех типов катодных материалов чётко выделяются шесть этапов эволюции напряжения при перезаряде.

Первый этап характеризуется линейным ростом напряжения, что обусловлено наличием остаточной

ёмкости как катода, так и анода, позволяющей аккумулятору воспринимать дополнительный заряд без немедленного перехода в опасное состояние. Продолжительность этапа варьируется в зависимости от катодного материала: для LFP и NCM622, и составляет, соответственно, 463 и 1043 с.

Второй этап сопровождается ускоренным возрастанием напряжения вследствие отрицательного сдвига потенциала, вызванного накоплением металлического лития на поверхности анода. Длительность этапа для LFP и NCM622 составляет, соответственно, 55 и 45 с.

Третий этап начинается при достижении точки «плато» напряжения, за которым следует участок с замедленным ростом напряжения (темп изменения производной напряжения существенно ниже, чем на втором этапе). Для NCM622 продолжительность этапа составляет 35 с., тогда как для LFP данный участок отсутствует.

Четвёртый этап вновь демонстрирует быстрый рост напряжения. Длительность этапа для LFP и NCM622 составляет, соответственно, 112 и 125 с.

Пятый этап характеризуется снижением напряжения. Продолжительность этапа для LFP и NCM622 составляет, соответственно, 175 и 91 с.

Шестой (заключительный) этап представляет собой критическую стадию перезаряда, сопровождающуюся резким скачком напряжения до максимального значения с последующим падением до нуля, что свидетельствует о наступлении теплового разгона.

В работе [19] исследовались ЛИА с размерами $95 \times 64 \times 5$ мм и массой около 63,5 г. В конструкции аккумулятора используется катод на основе $\text{Li}[\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}]\text{O}_2$ (NCM622), графитовый анод, а в качестве сепаратора применяется трёхслойная плёнка PP/PE/PP с керамическим покрытием.

Анализ кривой изменения (рис. 3) напряжения во времени при условиях динамического перезаряда позволяет выделить шесть характерных стадий, каждая из которых имеет специфические особенности.

На первом этапе наблюдается постепенное повышение напряжения с 4,511 до 5,036 В в течение 2934 с. На втором этапе в течение следующих 835 с напряжение быстро возрастает до уровня 5,344 В. Третий этап представляет собой «плато», где напряжение незначительно изменяется с 5,344 до 5,3 В в течение 580 с. Далее наблюдается резкий рост напряжения до 5,364 В в течение 262 с. На пятом этапе происходит падение напряжения до 5,29 В. В итоге аккумулятор переходит к тепловому разгону, и напряжение достигает критического значения 5,5 В.

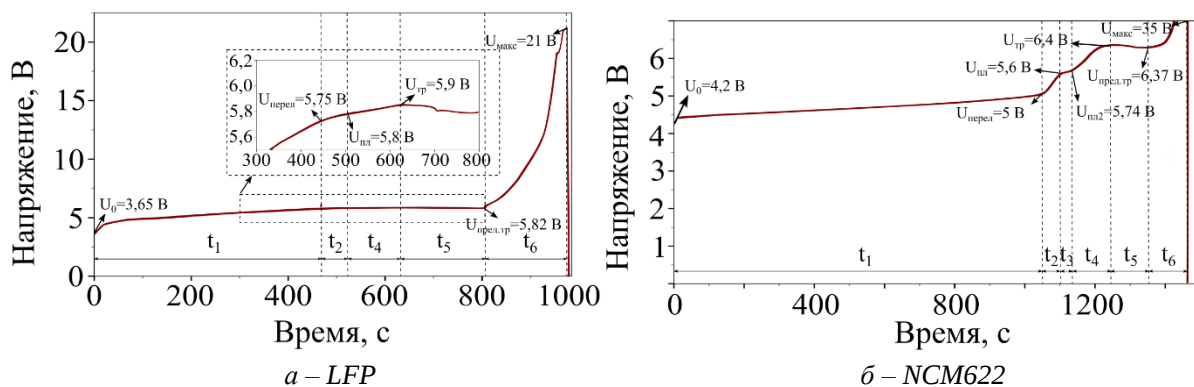


Рис. 2. Профиль напряжения двух аккумуляторов в условиях перезаряда. Воспроизведено из [18]

Fig. 2. Voltage profile of two cells under overcharge conditions. Reproduced from [18]

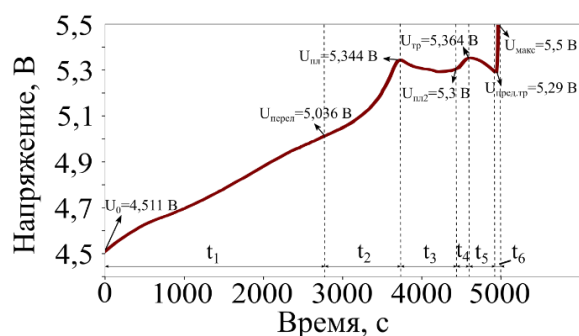


Рис. 3. Профиль напряжения аккумулятора в условиях перезаряда. Воспроизведено из [19]

Fig. 3. Voltage profile of the cell under overcharge conditions. Reproduced from [19]

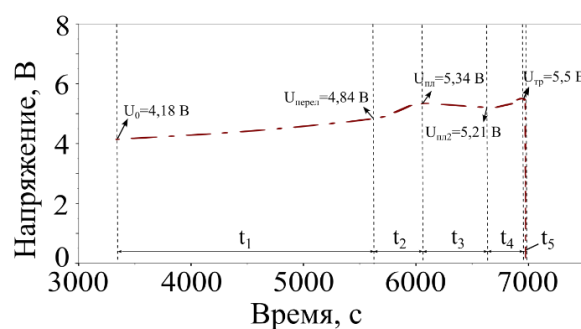


Рис. 4. Профиль напряжения аккумулятора при испытании на перезаряд. Воспроизведено из [20]

Fig. 4. Voltage profile of the cell during overcharge testing. Reproduced from [20]

В работе [20] проведено исследование влияния условий охлаждения на поведение ЛИА при перезаряде. В эксперименте используются герметичные прямоугольные ЛИА с номинальной ёмкостью 1,0 А·ч. Размеры аккумулятора составляют: толщина – 6,2 мм, ширина – 35 мм, высота – 53 мм.

Результаты эксперимента представлены на графике (рис. 4), где кривая зависимости напряжения от времени условно разделяется на пять характерных стадий.

Первая стадия начинается с момента, когда аккумулятор заряжен до 100 %. В течение 790 с. происходит медленный рост напряжения от значения 4,18 В до значения 4,84 В. На второй стадии наблюдается быстрое увеличение напряжения до значения 5,34 В. Третья стадия представляет собой переход к более стабильному режиму, сохраняющемуся на протяжении 589 с.

Четвёртая стадия сопровождается новым плавным подъёмом напряжения – от 5,21 В до его максимального значения 5,5 В за 270 с. Этот этап указывает на достижение аккумулятором предаварийного состояния.

Пятая стадия характеризуется стремительным снижением напряжения до нуля, наступлением теплового разгона и последующим разрушением аккумулятора.

Таким образом, на основе анализа результатов исследований, приведенных в работах [17–20] выделены ключевые параметры предаварийного состояния ЛИА, обобщённые в табл. 1. К числу наиболее характерных признаков, предшествующих наступлению аварийного режима, относятся:

- *начальная устойчивая стадия*, характеризующаяся медленным ростом напряжения до переломной точки $U_{\text{перел}}$ профиля напряжения аккумулятора;
- *стадия ускоренного повышения напряжения* до уровня $U_{\text{пл}}$, отражающая начало нестабильных процессов;
- *стадия «плато»*, при которой напряжение остаётся относительно стабильным и демонстрирует незначительное варьирование;
- *стадия вторичного резкого возрастания напряжения* до уровня $U_{\text{тр}}$, указывающая на приближение к критическому состоянию;
- *стадия кратковременного снижения напряжения*, наблюдаемая непосредственно перед началом теплового разгона;
- *финальная стадия*: скачкообразное возрастание напряжения до критического значения, сопровождающаяся переходом в режим теплового разгона.

Таблица 1. Количественные значения параметров профиля напряжения для предаварийного состояния ЛИА

Table 1. Quantitative parameter values of the voltage profile for the pre-failure state of the LIB

Ссылка Reference	Количественные значения параметров профиля напряжения для предаварийного состояния ЛИА Quantitative parameter values of the voltage profile for the pre-failure state of the LIB		
[17]	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	$t_1=96$ с. $U_0=3,65$ В $U_{перел}=4,2$ В	отсутствует absent	$t_3=602$ с. $U_{пл2}=2$ В
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	$t_4=55$ с. $U_{тр}=4,71$ В	$t_5=606$ с. $U_{пред,тр}=4,348$ В	$t_6=180$ с. $U_{макс}=5$ В
[18] (ЛИА с катодом LFP)	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	$t_1=463$ с. $U_0=3,65$ В $U_{перел}=5,75$ В	$t_2=55$ с. $U_{пл}=5,8$ В	отсутствует absent
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	$t_4=112$ с. $U_{тр}=5,9$ В	$t_5=175$ с. $U_{пред,тр}=5,82$ В	$t_6=173$ с. $U_{макс}=21$ В
[18] (ЛИА с катодом NCM622)	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	$t_1=1043$ с. $U_0=4,2$ В $U_{перел}=5$ В	$t_2=45$ с. $U_{пл}=5,6$ В	$t_3=35$ с. $U_{пл2}=5,74$ В
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	$t_4=125$ с. $U_{тр}=6,4$ В	$t_5=91$ с. $U_{пред,тр}=6,37$ В	$t_6=118$ с. $U_{макс}=35$ В
[19]	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	$t_1=2943$ с. $U_0=4,511$ В $U_{перел}=5,036$ В	$t_2=835$ с. $U_{пл}=5,344$ В	$t_3=580$ с. $U_{пл2}=5,3$ В
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	$t_4=262$ с. $U_{тр}=5,364$ В	$t_5=378$ с. $U_{пред,тр}=5,29$ В	$t_6=47$ с. $U_{макс}=5,5$ В
[20]	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	$t_1=790$ с. $U_0=4,18$ В $U_{перел}=4,84$ В	$t_2=436$ с. $U_{пл}=5,34$ В	$t_3=589$ с. $U_{пл2}=5,21$ В
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	$t_4=270$ с. $U_{тр}=5,5$ В	$t_5=62$ с. $U_{пред,тр}=0$ В	отсутствует absent

Принятые обозначения: $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ – интервалы времени, соответствующие шести стадиям, с.; U_0 – начальное значение напряжения предаварийного состояния ЛИА, В; $U_{перел}$ – начальное значение напряжения стадии ускоренного повышения напряжения, В; $U_{пл}$ – начальное значение напряжения стадии «плато», В; $U_{пл2}$ – окончательное значение напряжения стадии «плато», В; $U_{тр}$ – максимальное значение напряжения стадии вторичного резкого возрастания напряжения, В; $U_{пред.тр}$ – минимальное значение напряжения стадии кратковременного снижения напряжения, В; $U_{макс}$ – максимальное значение напряжения финальной стадии, В.

Accepted designations: $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ – time intervals corresponding to the six stages, s ; U_0 – initial voltage value of the LIB pre-failure state, V ; $U_{неперл}$ – initial voltage value of the accelerated voltage rise stage, V ; $U_{nл}$ – initial voltage value of the “plateau” stage, V ; $U_{nл2}$ – final voltage value of the “plateau” stage, V ; U_{mp} – maximum voltage value of the secondary sharp voltage rise stage, V ; $U_{непед.мп}$ – minimum voltage value of the short-term voltage drop stage, V ; $U_{макс}$ – maximum voltage value of the final stage, V .

Выделенные признаки могут служить основой обобщённой модели напряжения аккумулятора при возникновении предаварийного состояния, применяемой для имитационного тестирования и оценки эффективности алгоритмов прогнозирования отказов в ЛИА.

Для количественной оценки изменений между соседними значениями напряжения можно использовать значение нормированного изменения напряжения:

$$\sigma = \frac{U_2 - U_1}{U_1},$$

где U_1 – значение напряжения в предыдущий момент времени; U_2 – значение напряжения в текущий момент времени. Следует отметить, что положительный знак $\sigma > 0$ указывает на возрастание напряжения, отрицательный знак $\sigma < 0$ – на снижение напряжения.

Расчётные значения σ для рассмотренных выше примеров предаварийных состояний ЛИА приведены в табл. 2. Это позволяет оценить степень изменения напряжения с течением времени.

Таблица 2. Количественные значения изменения между соседними значениями напряжения ЛИА

Table 2. Quantitative values of the voltage difference between adjacent measurements for the LIB

Ссылка Reference	Значение σ Value σ		
[17]	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	0,037	0,109	отсутствует absent
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	0,121	-0,077	0,15
[18] (ЛИА с катодом LFP)	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	0,575	0,009	отсутствует absent
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	0,017	0,014	2,610
[18] (ЛИА с катодом NCM622)	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	0,19	0,12	0,025
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	0,115	-0,005	4,495
[19]	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	0,116	0,061	-0,008
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	0,012	-0,014	0,04
[20]	Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
	0,158	0,103	-0,008
	Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
	-0,017	-1	отсутствует absent

Положительные значения σ указывают на этапы роста напряжения (стадии 1, 2, 3, 4, 6), а отрицательные – на его спад (стадия 5). Стадия, где отмечено «отсутствует», интерпретируется как ее отсутствие на графике напряжения. Величина значения характеризует интенсивность изменения напряжения на соответствующем этапе. Данные значения

были использованы для параметризации амплитуд изменений напряжения в разрабатываемых моделях.

На основе анализа данных, представленных в табл. 1, 2 устанавливается диапазон изменения количественных характеристик, результаты которого обобщены в табл. 3. Представленные данные позволяют выявить характерные изменения напряжения в предаварийном состоянии при перезаряде ЛИА.

Таблица 3. Диапазон изменений параметров профиля напряжения

Table 3. Range of variation of the voltage profile parameters

Диапазон относительного изменения/Range of relative variation		
Стадия 1/Stage 1	Стадия 2/Stage 2	Стадия 3/Stage 3
$\Delta t=[46...2934]$ с	$\Delta t=[45...835]$ с	$\Delta t=[0...589]$ с
$\Delta \sigma=[0,037...0,575]$	$\Delta \sigma=[0,009...0,12]$	$\Delta \sigma=[-0,008...0,025]$
Стадия 4/Stage 4	Стадия 5/Stage 5	Стадия 6/Stage 6
$\Delta t=[55...270]$ с	$\Delta t=[62...606]$ с	$\Delta t=[0...180]$ с
$\Delta \sigma=[0,017...0,121]$	$\Delta \sigma=[-1...-0,005]$	$\Delta \sigma=[0...4,495]$

Для проведения исследований разработаны две модификации модели напряжения при возникновении предаварийного состояния ЛИА в случае его перезаряда.

Основная идея заключается в следующем: на основе анализа экспериментальных кривых напряжения выявляются характерные признаки предаварийного состояния ЛИА, которые представляют собой перегиб, скачок напряжения. После этого кривая напряжения разбивается на ограниченное число сегментов, каждый из которых соответствует локальному участку, содержащему потенциально значимый признак. Каждый сегмент характеризуется двумя параметрами: временной продолжительностью отрезка и относительной амплитудой изменения значений напряжения. Данные параметры представляют собой числовые характеристики предаварийного состояния ЛИА.

При построении модели используется стохастический подход, параметры каждого сегмента (длительность и амплитуда), на основании которых формируются так называемые узловые точки, выбираются случайным образом из диапазона, указанного в табл. 3. Такой метод позволяет генерировать множество уникальных профилей напряжения, отражающих как усреднённые характеристики, так и наихудшие сценарии развития предаварийного состояния, что повышает робастность модели.

При этом задача заключается в том, чтобы построить аппроксимирующие кривые, проходящие через определенные узловые точки. Для аппроксимации используются такие методы интерполяции, как линейная интерполяция и кубическая интерполяция Эрмита.

В рамках работы предлагается использовать две модели временной зависимости напряжения ЛИА

при достижении предаварийного состояния. Первая представляет собой базовую (грубую) модель, в которой для аппроксимации узловых точек применяется линейная интерполяция [21]. Вторая модель является более точной и основана на кубической интерполяции Эрмита. Алгоритм построения обеих моделей представлен на рис. 5.

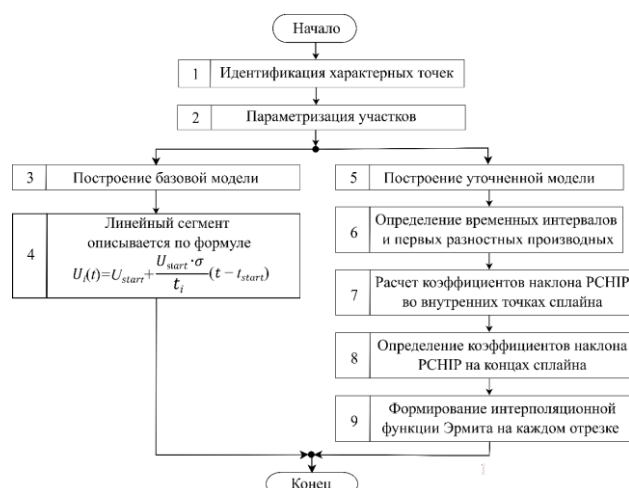


Рис. 5. Алгоритм построения обеих моделей
Fig. 5. Algorithm for constructing both models

Алгоритм построения базовой модели

Базовая модель реализует упрощённый подход к моделированию, основанный на линейной интерполяции между узловыми точками. Алгоритм её построения включает следующие этапы:

1. Идентификация характерных узловых точек. На основании анализа экспериментальных данных определяются ключевые участки кривой напряжения, отражающие существенные изменения в процессе перезаряда аккумулятора (табл. 1).
2. Параметризация участков. Каждый участок параметризуется с использованием статистических характеристик (табл. 3) и учётом случайного варьирования длительности и амплитуды напряжения. Такой стохастический подход отражает разброс характеристик, вызванный технологическими отклонениями и разными условиями эксплуатации.
3. Формирование линейных сегментов. Каждый сегмент определяется двумя точками с заданной длительностью и амплитудой изменения напряжения. Линейный сегмент описывает линейное изменение напряжения U на отрезке времени $[t_{start}, t_{start} + t_i]$:

$$U_i(t) = U_{start} + \frac{U_{start} \cdot \sigma}{t_i} (t - t_{start}),$$

где σ – значение нормированного изменения напряжения на интервале $[t_{start}, t_{start} + t_i]$; t_i – интервал

времени, $i \in 1, \dots, 6$. Это соответствует уравнению прямой линии с угловым коэффициентом

$$m = \frac{U_{end} - U_{start}}{t_i},$$

где $U_{end} = U_{start}(1 + \sigma)$.

В результате формируется модель в виде последовательности, например, шести линейных сегментов, соединённых между собой, образующих приближённый профиль напряжения. Графическое представление результатов работы модели приведено на рис. 6, а, б.

Предложенный подход обеспечивает оперативную генерацию типового профиля напряжения ЛИА в условиях перезаряда, а также позволяет выявить характерные тренды, предшествующие развитию аварийной ситуации. Однако его основным недостатком является ограниченность линейной аппроксимации, неспособной точно воспроизводить нелинейные участки кривой напряжения аккумулятора.

Алгоритм построения уточнённой модели

С целью повышения точности моделирования можно использовать уточнённую модель, основанную на применении, например, кубической интерполяции Эрмита (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial – РСНП). В отличие от стандартного кубического сплайна, этот метод гарантировано обеспечивает монотонность и подавляет осцилляции, сохраняя реалистичную форму кривой [21, 22].

Алгоритм построения уточненной модели включает следующие этапы:

- 1) Идентификация характерных точек. Выделяются характерные участки кривой напряжения аналогично базовой модели.
- 2) Параметризация участков. Аналогично, как при построении базовой модели. Для каждого малого интервала $[t_j, t_{j+1}]$ времени вычисляются шаги h_j интерполяции и первые разностные производные δ_j в точке t_j по следующим формулам:

$$h_j = t_{j+1} - t_j,$$

$$\delta_j = \frac{U_{j+1} - U_j}{h_j},$$

где U_j, U_{j+1} – значения сплайн-функции в точках t_j, t_{j+1} .

- 3) Расчет коэффициентов наклона РСНП во внутренних точках сплайна. Для обеспечения монотонности и устранения осцилляций в интерполяционной кривой используются формулы РСНП. На каждом интервале $[t_j, t_{j+1}]$ наклон (первая производная) во внутренних точках m_j вычисляется как:

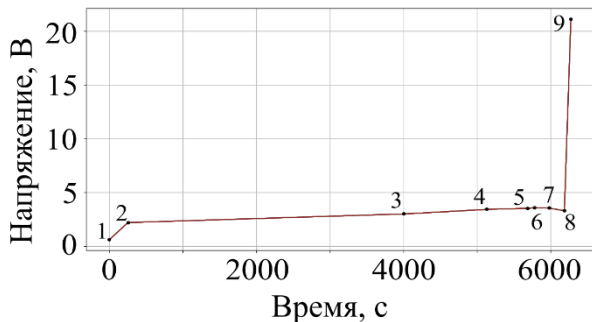
$$m_j = \frac{w_1 + w_2}{\frac{w_1}{\delta_{j-1}} + \frac{w_2}{\delta_j}},$$

где m_j – коэффициенты наклона РСНП во внутренней точке t_j ; $w_1 = 2h_j + h_{j-1}$, $w_2 = h_j + 2h_{j-1}$ – вес, соответствующий точкам t_j, t_{j+1} . Если δ_{j-1} и δ_j имеют разные знаки или хотя бы одно из них равно нулю, m_j полагается равным нулю, чтобы избежать переосцилляций.

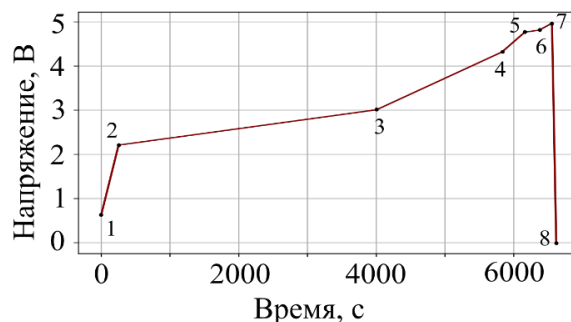
- 4) Определение коэффициентов наклона РСНП на концах сплайна. Для обеспечения гладкого соединения с интерполяционным полиномом в крайних точках t_0, t_{n-1} наклоны РСНП определяются по формуле [23]:

$$m_0 = \begin{cases} 0, & \text{если } m_0 \delta_0 \leq 0, \\ 3\delta_0, & \text{если } |m_0| > 3|\delta_0|, \\ \delta_0(1 + \frac{h_0}{h_0 + h_1}) - \delta_1 \cdot \frac{h_0}{h_0 + h_1}, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

$$m_{n-1} = \begin{cases} 0, & \text{если } m_{n-1} \delta_{n-1} \leq 0, \\ 3\delta_{n-1}, & \text{если } |m_{n-1}| > 3|\delta_{n-1}|, \\ \delta_{n-1}(1 + \frac{h_{n-1}}{h_{n-1} + h_{n-2}}) - \delta_{n-2} \cdot \frac{h_{n-1}}{h_{n-1} + h_{n-2}}, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$



а



б

Рис. 6. Примеры результатов работы базовой модели
 Fig. 6. Examples of a basic model performance

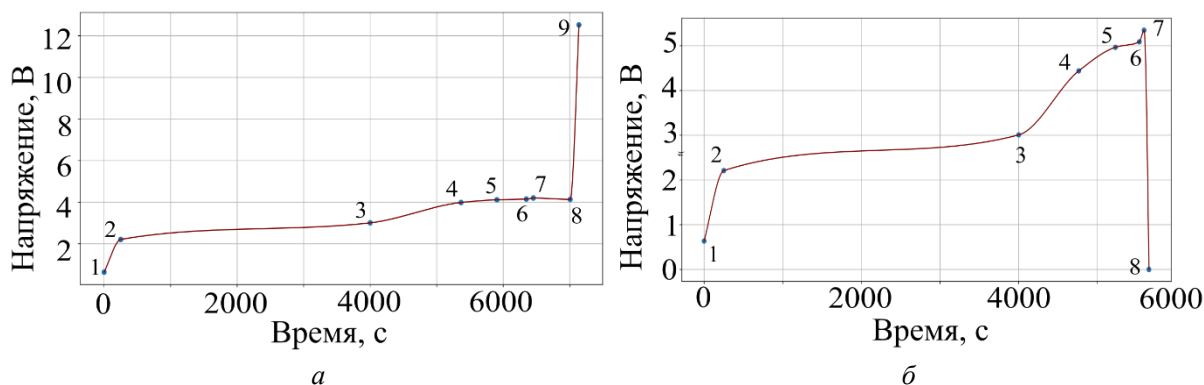


Рис. 7. Примеры результатов работы уточненной модели
Fig. 7. Examples of a refined model performance

Формирование интерполяционной функции Эрмита на каждом отрезке $[t_j, t_{j+1}]$. На каждом отрезке $[t_j, t_{j+1}]$ кубическая интерполяция Эрмита позволяет записать $U_j(x)$ в виде [24]:

$$U_j(t) = h_{00}(x)U_j + h_{10}(x)h_j m_j + h_{01}(x)U_{j+1} + h_{11}(x)h_j m_{j+1},$$

где $h_{00}(x)$, $h_{10}(x)$, $h_{01}(x)$, $h_{11}(x)$ – базисные функции Эрмита, определяются как:

$$h_{00}(x) = 2x^3 - 3x^2 + 1; h_{10}(x) = x^3 - 2x^2 + x;$$

$$h_{01}(x) = -2x^3 + 3x^2; h_{11}(x) = x^3 - x^2,$$

где $x = \frac{t - t_j}{h_j}$.

Полученный результат представлен в виде графика (рис. 7). Видно, что кривые более точно и монотонно воспроизводят динамику изменения напряжения во времени, по сравнению с грубой моделью.

Для сравнения точности двух предложенных моделей использованы экспериментальные данные профиля напряжения, приведённые в работе [17] (рис. 3). Данные позволяют оценить адекватность аппроксимации реального сигнала обеими моделями.

Верификация каждой модели включает следующие этапы:

- 1) загрузку и нормализацию исходных значений напряжения по времени;
- 2) аппроксимацию исходной зависимости напряжения ЛИА методом линейной интерполяции или кубической интерполяцией Эрмита;
- 3) формирование интерполированных кривых напряжения и расчёт количественной метрики отклонения: средней относительной ошибки (Mean Relative Error – MRE);
- 4) сравнительный анализ полученных значений MRE и визуальную оценку степени совпадения интерполированных профилей напряжения с экспериментальными данными.

Результат сравнения моделей представлен на графиках (рис. 8, 9). Видно, что уточненная модель показывает более высокую адекватность при сравнении с экспериментальными данными, максимальная погрешность составляет примерно 6,5 %, а MRE=0,6 %.

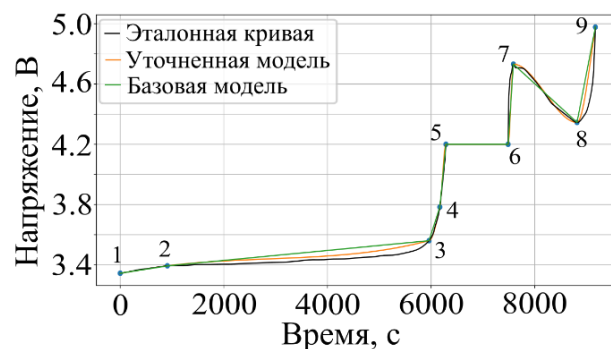


Рис. 8. Сравнение результатов работы базовой и уточненной моделей
Fig. 8. Comparison of the performance of the basic and refined models

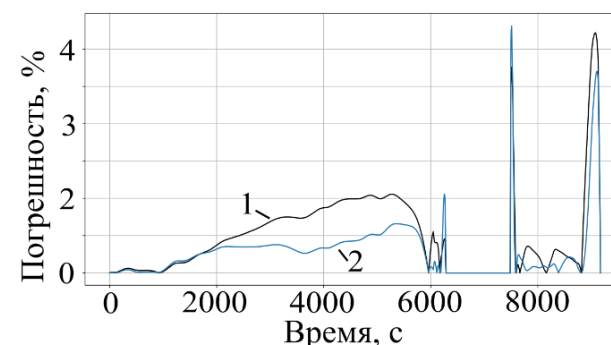


Рис. 9. Погрешность при сравнении результатов работы моделей с эталонными данными: 1 – базовая модель; 2 – уточненная модель
Fig. 9. Error in comparison of the performance of models with reference data: 1 – basic model; 2 – refined model

Заключение

Предложен подход к моделированию поведения ЛИА в условиях перезаряда. Предлагается использовать две взаимодополняющие математические модели напряжения аккумулятора, которые можно применить для решения задачи прогнозирования возникновения аварийных состояний ЛИА:

- базовую модель, основанную на линейной аппроксимации, обеспечивающей оперативную генерацию типовых профилей напряжения;
- уточненную модель, учитывающую нелинейные эффекты и позволяющую достаточно точно воспроизводить динамику изменения напряжения.

Сравнительный анализ выявил существенные ограничения базовой модели, связанные с невозможностью адекватного описания нелинейных участков временных характеристик напряжения ЛИА. В отличие от базовой модели, уточненная модель демонстрирует более высокую точность воспроизведения экспериментальных данных.

Для верификации модели проведено сравнительное исследование расчетных данных с экспериментальными результатами, представленными в работе [17]. Анализ показал, что предложенная уточненная модель достоверно воспроизводит ди-

намику изменения напряжения на предаварийной стадии. Количественные показатели точности включают максимальную относительную погрешность, не превышающую 6,5 %, и среднюю относительную ошибку на уровне 0,6 %.

Полученные результаты демонстрируют, что разработанная модель обеспечивает высокую точность численного моделирования предаварийного состояния ЛИА при перезаряде и возможность прогнозирования критических состояний ЛИА.

Следует отметить, что текущая версия модели соответствует ограниченному набору типов аккумуляторов. Для практического применения модели для других типов аккумуляторов необходимо:

- выполнить сбор экспериментальных данных о напряжении для конкретного типа ЛИА;
- провести идентификацию характерных признаков предаварийного состояния;
- осуществить параметрическую настройку модели под конкретные условия эксплуатации.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение области применения модели для различных химических источников тока и условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальные экологические проблемы и пути их разрешения. URL: <https://akushadargo.ru/articles/media/2024/5/28/globalnyie-ekologicheskie-problemyi-i-puti-ih-razresheniya/> (дата обращения: 24.05.2025).
2. Горюшина Е.А. Глобальные экологические вызовы: необходимость международного сотрудничества // Новизна. Эксперимент. Традиции (Н.Экс.Т). – 2022. – Т. 8. – № 4 (20). – С. 32–40.
3. Глобальные плюсы глобального потепления. URL: <https://siriusmag.ru/articles/2925-glavnie-plyusi-globalnogo-potepleniya-i-kakaya-ot-nego-polza-rossii/> (дата обращения: 24.05.2025).
4. Парижское Соглашение. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542655698> (дата обращения: 24.05.2025).
5. Возобновляемые источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю.П. Степура, Р.А. Сулейманов, Е.А. Власенко, А.Г. Власов. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2012. – 272 с.
6. Global carbon budget 2019 / P. Friedlingstein, M.W. Jones, M. O'sullivan et al. // Earth System Science Data Discussions. – 2019. – P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
7. Top five renewable energy challenges for the utilities industry. URL: <https://www.sap.com/central-asia-caucasus/resources/renewable-energy-challenges> (дата обращения: 25.05.2025).
8. Нефёдова Л.В., Рафикова Ю.Ю. Проблема оценки рисков использования возобновляемых источников энергии // Окружающая среда и энерговедение. – 2022. – № 1. – С. 48–61.
9. Что такое системы накопления энергии и зачем они нужны. URL: <https://ekb.tokarsenal.ru/chto-takoe-sistemy-nakopleniya-energii-i-zachem-oni-nuzhny> (дата обращения: 25.05.2025).
10. Булатов Р.В., Насыров Р.Р., Бурмейстер М.В. Применение систем накопления электроэнергии для повышения коэффициента использования установленной мощности электростанций на базе возобновляемых источников энергии в составе электрических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 6. – С. 74–80.
11. Микроволновая обработка кофейных отходов для получения пористых углеродных материалов и их применение в кремний-углеродных анодах литий-ионных аккумуляторов / Э.Н. Дүйсенбек, Е.Е. Бейсенова, Р.Е. Бейсенов, К. Аскарұлы // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. – 2025. – Т. 22. – № 1. – С. 318–329. DOI: <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-1-318-329>.
12. Innovative solutions for high-performance silicon anodes in lithium-ion batteries: overcoming challenges and real-world applications / M. Khan, S. Yan, M. Ali, F. Mahmood, Y. Zheng, G. Li et al. // Nano-Micro Lett. – 2024. – Vol. 16. – № 179. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01388-3>.
13. Schaeffler S., Jossen A. In situ measurement and modeling of internal thermal runaway propagation within lithium-ion cells under local overheating conditions // Journal of Power Sources. – 2024. – Vol. 614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234968>.
14. On the characterization of lithium-ion batteries under overtemperature and overcharge conditions: identification of abuse areas and experimental validation / I. Lalinde, A. Berrueta, J. Arza, P. Sanchis, A. Ursúa // Applied Energy. – 2024. – Vol. 354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122205>.
15. Experimental study of capacity fading mechanism in multiple overdischarge on LiNiO. 5CoO. 2MnO. 3O2&LiMn2O4/graphite lithium-ion batteries / H. Zhu, J. Ma, H. Ding, H. Wu, C. Zhang, X. Fang, H. Xuan, L. Lao, L. Ni, X. Wang // Ceramics International. – 2024. – Vol. 50. – № 19. – P. 35537–35548.

16. Advances and challenges in thermal runaway modeling of lithium-ion batteries / G. Wang, P. Ping, D. Kong, R. Peng, X. He, Y. Zhang, X. Dai, J. Wen // *The Innovation*. – 2024. – Vol. 5. – № 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100624>.
17. Research on overcharge and overdischarge effect on lithium-ion batteries / C. Wu, J. Sun, C. Zhu, Y. Ge, Y. Zhao // 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). – 2015. – P. 1–6.
18. Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials: a comparison study / Z. Wang, J. Yuan, X. Zhu, H. Wang, L. Huang // *Journal of Energy Chemistry*. – 2021. – Vol. 55. – P. 484–498.
19. Zhang G. Revealing the failure mechanisms of lithium-ion batteries during dynamic overcharge / G. Zhang, X. Wei, J. Zhu, S. Chen, G. Han, H. Dai // *Journal of Power Sources*. – 2022. – Vol. 543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231867>.
20. Mao N. Overcharge cycling effect on the thermal behavior, structure, and material of lithium-ion batteries / N. Mao, Z.R. Wang, Y.H. Chung, C.M. Shu // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114147>.
21. Moler C.B. Numerical computing with MATLAB // Society for Industrial and Applied Mathematics. – 2004. DOI: https://www.mathworks.com/moler/index_ncm.html.
22. Fritsch F.N., Carlson R.E. Monotone piecewise cubic interpolation // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. – 1980. – Vol. 17. – № 2. – P. 238–246.
23. Ромаданова М.М. Алгоритмы построения монотонного весового кубического сплайна // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 9. – С. 180–192.
24. Квасов Б.И. Монотонная и выпуклая интерполяция весовыми кубическими сплайнами // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Т. 53. – № 10. – С. 1610–1621.

Информация об авторах

Виктор Григорьевич Букреев, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; bukreev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>

Ле Жа Хоанг Хай Шон, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; sonsevas98@gmail.com

Поступила в редакцию: 12.09.2025

Поступила после рецензирования: 22.09.2025

Принята к публикации: 22.09.2025

REFERENCES

1. *Global environmental issues and their solutions*. (In Russ.) Available at: <https://akushadargo.ru/articles/media/2024/5/28/globalnyie-ekologicheskie-problemyi-i-puti-ih-razresheniya/> (accessed 24 May 2025).
2. Goryushina E.A. Global environmental challenges: the need for international cooperation. *Novelty. Experiment. Traditions (N.Ex.T)*, 2022, vol. 8, no. 4 (20), pp. 32–40. (In Russ.)
3. *Global benefits of global warming*. (In Russ.) Available at: <https://siriusmag.ru/articles/2925-glavnie-plyusi-globalnogo-potepleniya-i-kakaya-ot-nego-polza-rossii/> (accessed: 24 May 2025).
4. *Paris Agreement*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/542655698> (accessed 24 May 2025).
5. Grigorash O.V. *Renewable energy sources*. Krasnodar, Kuban State Agrarian University Publ., 2012. 272 p. (In Russ.)
6. Friedlingstein P., Jones M.W., O'sullivan M. Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data Discussions*, 2019, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
7. *Top five renewable energy challenges for the utilities industry*. Available at: <https://www.sap.com/central-asia-caucasus/resources/renewable-energy-challenges> (accessed 25 May 2025).
8. Nefedova L.V. The problem of assessing the risks of using renewable energy sources. *Environment and energy science*, 2022, no. 1, pp. 48–61. (In Russ.)
9. *What are energy storage systems and why are they needed*. (In Russ.) Available at: <https://ekb.tokarsenal.ru/chto-takoe-sistemy-nakopleniya-energii-i-zachem-oni-nuzhny> (accessed 25 May 2025).
10. Bulatov R.V. Application of electricity storage systems to increase the efficiency of installed capacity of power plants based on renewable energy sources as part of electrical systems. *Electricity. Transmission and distribution*, 2021, no. 6, pp. 74–80. (In Russ.)
11. Duysenbek A.N. Microwave processing of coffee waste to obtain porous carbon materials and their application in silicon-carbon anodes of lithium-ion batteries. *Bulletin of the Kazakh-British Technical University*, 2025, vol. 22, no. 1, pp. 318–329. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-1-318-329>.
12. Khan M., Yan S., Ali M., Mahmood F., Zheng Y., Li G. Innovative solutions for high-performance silicon anodes in lithium-ion batteries: overcoming challenges and real-world applications. *Nano-Micro Lett*, 2024, vol. 16, no. 179. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01388-3>.
13. Schaeffler S., Jossen A. In situ measurement and modeling of internal thermal runaway propagation within lithium-ion cells under local overheating conditions. *Journal of Power Sources*, 2024, vol. 614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234968>.
14. Lalinde I., Berrueta A., Arza J., Sanchis P., Ursúa A. On the characterization of lithium-ion batteries under overtemperature and overcharge conditions: identification of abuse areas and experimental validation. *Applied Energy*, 2024, vol. 354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122205>.
15. Zhu H., Ma J., Ding H., Wu H., Zhang C., Fang X., Xuan H., Lao L., Ni L., Wang X. Experimental study of capacity fading mechanism in multiple overdischarge on LiNiO₂ 5CoO₂ 2MnO₂ 3O₂&LiMn₂O₄/graphite lithium-ion batteries. *Ceramics International*, 2024, vol. 50, no. 19, pp. 35537–35548.

16. Wang G., Ping P., Kong D., Peng R., He X., Zhang Y., Dai X., Wen J. Advances and challenges in thermal runaway modeling of lithium-ion batteries. *The Innovation*, 2024, vol. 5, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100624>.
17. Wu C., Sun J., Zhu C., Ge Y., Zhao Y. Research on overcharge and overdischarge effect on lithium-ion batteries. *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2015, pp. 1–6.
18. Wang Z., Yuan J., Zhu X., Wang H., Huang L. Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials: a comparison study. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, vol. 55, pp. 484–498.
19. Zhang G., Wei X., Zhu J., Chen S., Han G., Dai H. Revealing the failure mechanisms of lithium-ion batteries during dynamic overcharge. *Journal of Power Sources*, 2022, vol. 543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231867>.
20. Mao N., Wang Z.R., Chung Y.H., Shu C.M. Overcharge cycling effect on the thermal behavior, structure, and material of lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114147>.
21. Moler C.B. Numerical computing with MATLAB. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2004. DOI: https://www.mathworks.com/moler/index_ncm.html.
22. Fritsch F.N., Carlson R.E. Monotone piecewise cubic interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1980, vol. 17, no. 2, pp. 238–246.
23. Romadanova M.M. Algorithms for constructing a monotone weighted cubic spline. *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*, 2018, no. 9, pp. 180–192. (In Russ.)
24. Kvasov B.I. Monotone and convex interpolation by weighted cubic splines. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2013, vol. 53, no. 10, pp. 1610–1621. (In Russ.)

Information about the authors

Viktor G. Bukreev, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; bukreev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>

Le Gia Hoang Hai Son, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; sonsevas98@gmail.com

Received: 12.09.2025

Revised: 22.09.2025

Accepted: 22.09.2025