

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-381-392>

УДК 621.355.1

Моделирование сборок аккумуляторных батарей в электронной лаборатории

К. В. Доброго¹⁾, Ю. В. Бладыко²⁾

¹⁾Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В исследовании представлено моделирование процессов заряда-разряда сборок аккумуляторных батарей с учетом их деградации. Приведены результаты симулирования циклической работы сборок батарей в электронной лаборатории Electronics Workbench и возможные схемы соединения. Рассмотрены варианты перекоммутации аккумуляторных батарей во время работы, подключения дополнительных элементов для продления срока службы сборки. При моделировании учитывалось наличие в сборке одной дефектной батареи. Проведено сравнение работы сборок с дефектной батареей и эталонной. В результате сравнения способов соединения батарей предпочтительным признан параллельно-последовательный способ. Для такой сборки временные параметры работы остались практически неизменными, однако напряжения в дефектной и других батареях изменились более чем в два раза по сравнению с последовательно-параллельным соединением. Проанализированы изменения заряда, напряжения и тока сборок с деградировавшей батареей и эталонной. Показаны временные диаграммы для батарей, подключенных параллельно и последовательно с дефектной. Потери мощности в дефектной батарее снижаются при выборе параллельно-последовательной сборки, а переключение сборки с последовательно-параллельным соединением в параллельно-последовательное не приводит к компенсации деградации параметров батареи. Изменение временных интервалов переключения в широком диапазоне не способствует увеличению емкости дефектной батареи. Деградация параметров батареи вызывает более резкие скачки напряжения, заряда и тока. Дополнительная же подпитка энергией дефектной батареи поддерживает работоспособность всей сборки. Подпитка может быть выполнена подключением параллельно с дефектной дополнительной батареи или конденсатора, что равносильно замене деградировавшей батареи на новую.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, заряд, разряд, емкость, деградация, соединение, переключение, подпитка

Для цитирования: Доброго, К. В. Моделирование сборок аккумуляторных батарей в электронной лаборатории / К. В. Доброго, Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 5. С. 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-381-392>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Высшая аттестационная комиссия
Республики Беларусь
просп. Независимости, 66,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-11-57
dobrego@vak.gov.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Higher Attestation Commission of the
Republic of Belarus
66, Nezavisimosty Ave.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-11-57
dobrego@vak.gov.by

Modeling Battery Connections in the Electronic Lab

K. V. Dobrego¹⁾, Y. V. Bladyko²⁾

¹⁾Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper deals with the modeling of the processes of charge-discharge of battery assemblies taking into account their degradation. The results of simulating the cyclic operation of battery assemblies in the Electronics Workbench electronic laboratory are presented, possible schemes of inclusion are given, and options for re-switching batteries during operation are considered as well as connecting additional elements to extend the life of the connection. The simulation took into account the presence of one defective battery in the assembly. The operation of the assembly with a defective battery and a reference battery was compared. As a result of the analysis of parallel-serial and serial-parallel battery connections, the first one is considered preferable. For an assembly with a parallel-serial connection, the time parameters of operation remained almost unchanged, but the differences in the voltages of the defective and other batteries changed more than twice as compared with a serial-parallel connection. The changes in charge, voltage and current of assemblies with a degraded battery and a reference battery are analyzed. Timing diagrams are shown for batteries connected in parallel and in series with defective batteries. Power losses in a defective battery are reduced by choosing a parallel-series assembly, while switching a connection from a serial-parallel connection to a parallel-series one does not lead to compensation for the degradation of battery parameters. Changing the switching time intervals in a wide range does not contribute to increasing the capacity of a defective battery. Degradation of battery parameters leads to sharper surges in voltage, charge and current. The additional power recharge of the defective battery maintains the performance of the entire assembly. Recharge can be performed by connecting in parallel a defective additional battery or a capacitor, which is equivalent to replacing a degraded battery with a new one.

Keywords: battery, charge, discharge, capacity, degradation, connection, switching, recharge

For citation: Dobrego K. V., Bladyko Y. V. (2021) Modeling Battery Connections in the Electronic Lab. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (5), 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-381-392> (in Russian)

Введение

Вопросы продления срока службы аккумуляторных батарей (АКБ) и их сборок актуальны для ряда отраслей [1–9]. Необходимо также решать задачи оптимизации схем подключения, управления работой больших сборок АКБ с учетом деградации параметров отдельных батарей в зависимости от типа, конструкции, режима заряда-разряда, условий эксплуатации. Важным инструментом решения указанных проблем может стать компьютерное моделирование процессов заряда-разряда АКБ и их сборок с учетом эффектов деградации.

В [10] показана работоспособность электронной лаборатории Electronics Workbench [11], предоставляющей при использовании критерия подобия возможности усложнения схем и анализа больших параллельно-последовательных сборок АКБ.

Перспективной целью исследований, проводимых на энергетическом факультете БНТУ [12] и, в частности, авторами настоящей статьи, является использование АКБ в крупных сборках для повышения эффективности

энергообеспечения жилых помещений, объектов ЖКХ и промышленности. В представленной работе с помощью компьютерного моделирования анализируется «коллективное» поведение аккумуляторных ячеек или АКБ в параллельно-последовательных сборках, приводятся результаты такого симулирования и возможные схемы подключения, рассматриваются варианты перекоммутации схем во время работы, подключения дополнительных элементов для продления срока службы сборки АКБ. Анализируются сборки из четырех АКБ, однако результаты могут распространяться и на сборки с большим числом элементов.

Выбор схемы соединений сборок аккумуляторных батарей

В общем случае для сборок АКБ возможны последовательные, параллельные соединения и их комбинации. Вид соединений диктуется уровнем напряжения и другими техническими соображениями. Последовательное соединение электротехнических элементов считается менее надежным, так как обрыв пути протекания тока в любом месте приводит к потере электроснабжения всей цепи. Причиной обрыва могут стать плохой монтаж, пайка, окисление контактов, неисправность одного из источников или приемников и т. д. В то же время для параллельного соединения требуется больше коммутационных соединений (проводов).

Для сборки четырех АКБ возможны два варианта соединения: последовательно-параллельное (рис. 1а) и параллельно-последовательное (рис. 1б).

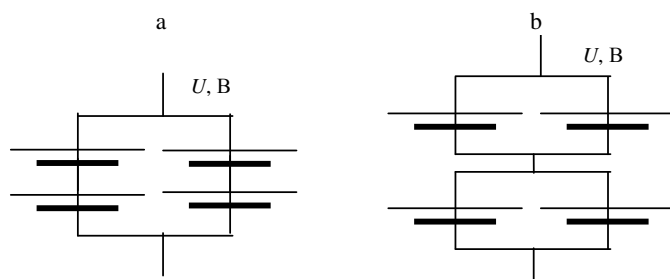


Рис. 1. Сборка четырех аккумуляторных батарей:
а – последовательно-параллельная; б – параллельно-последовательная
Fig. 1. Connection of four batteries: a – serial-parallel; b – parallel-serial

При последовательно-параллельном соединении обрыв любой ветви источников оставляет в работе вторую ветвь, увеличивая на нее токовую нагрузку и снижая работоспособность сборки до 50 %. В случае параллельно-последовательного подключения обрыв цепи одной АКБ ведет к потере электроснабжения только на 25 %, при этом также возрастает токовая нагрузка на оставшуюся без параллельного соединения батарею. Это подтверждает преимущество параллельно-последовательной сборки. Однако для преобразования последовательно-параллельного соединения в параллельно-последовательное требуются дополнительные перемычки.

Если в сборке имеется дефектная АКБ с уменьшенной емкостью и увеличенным внутренним сопротивлением, происходит перераспределение напряжений и токов, процентное снижение суммарной емкости сборки будет меньше, чем указанные выше предельные.

Моделирование последовательно-параллельной сборки аккумуляторной батареи

Моделирование проводилось в электронной лаборатории Electronics Workbench по схеме, описанной в [10], с использованием критерия подобию (рис. 2).

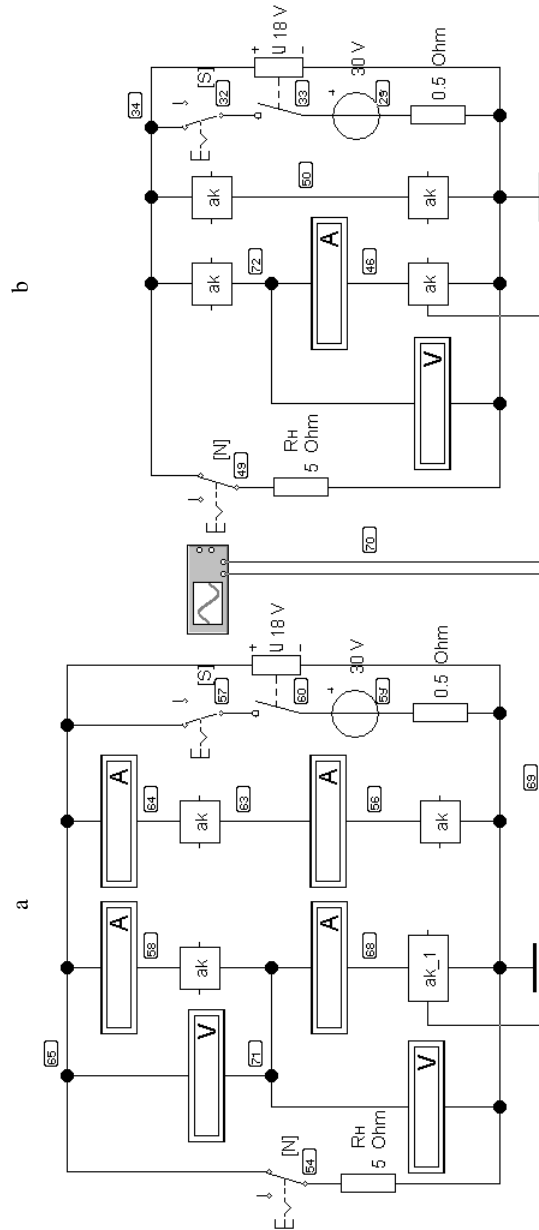


Рис. 2. Последовательно-параллельная сборка четырех аккумуляторных батарей:

a – с дефектной батареей (подцепь ak_1); b – эталонная

Fig. 2. Series-parallel connection of four batteries: a – connection under study;

b – reference connection

Емкость конденсатора, моделирующего АКБ, составляла 5 Ф, что соответствует емкости АКБ 60 А·ч напряжением 12 В при замене размерности оси времени с секунд на часы. Одновременно моделировались: эталонная сборка (рис. 2b), состоящая из одинаковых АКБ (подцепи ак) с номинальными параметрами (5 Ф, что соответствует 60 А·ч, внутреннее сопротивление 0,1 Ом); тестируемая сборка (рис. 2a) с одной дефектной АКБ (подцепь ак_1) с уменьшенной на 10 % емкостью (4,5 Ф, что соответствует 54 А·ч) и увеличенным внутренним сопротивлением 0,15 Ом.

Временные диаграммы состояния заряда в ходе зарядно-разрядного циклирования исправной АКБ в эталонной сборке и дефектной АКБ в тестируемой представлены на рис. 3. Показан тренд деградации емкости дефектной АКБ.

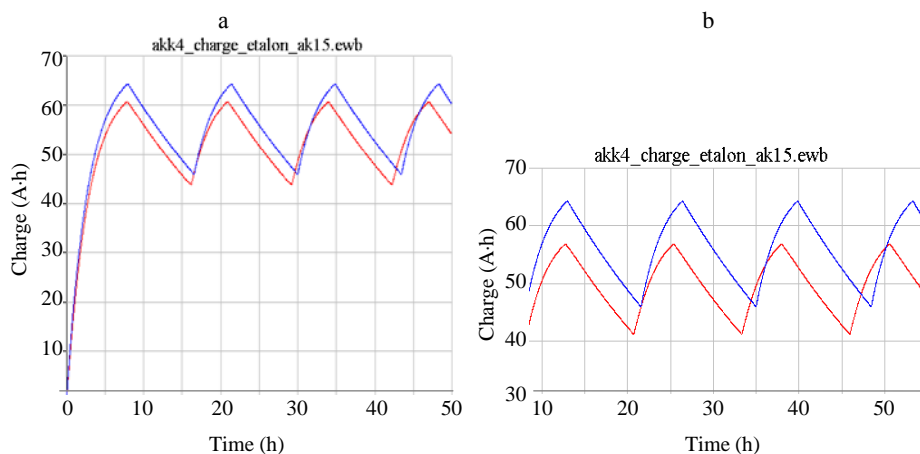


Рис. 3. Временная диаграмма состояния заряда исправной батареи (синяя линия) в эталонной сборке и дефектной батареи (красная линия):

a – с первоначальной деградацией параметров; b – с прогрессирующей деградацией

Fig. 3. Timing diagram of charge of an operable battery (blue line) in the reference assembly and a defective battery (red line): a – when the parameters are degraded initially;

b – when the degradation is progressive

В ходе циклирования происходит ускоренная деградация дефектной АКБ – дальнейшее уменьшение емкости с 4,5 до 4,0 Ф (до 48 А·ч) и увеличение внутреннего сопротивления с 0,15 до 0,20 Ом.

Анализ диаграмм показывает, что наличие дефектной АКБ в сборке приводит к перераспределению токов и напряжений. На дефектной АКБ напряжение возрастает, на остальных исправных АКБ – понижается. Большая токовая нагрузка ложится на батареи, расположенные параллельно с дефектной, поскольку они помогают ей заряжаться, увеличивая свой ток разряда. Потери мощности увеличиваются и у деградировавшей батареи.

Уменьшение емкости на 10 % и увеличение внутреннего сопротивления (с 0,10 до 0,15 Ом) дефектной АКБ приводят к сокращению времени разряда исследуемой сборки на 3,5 % по сравнению с эталонной. При дальнейшей деградации (уменьшение емкости на 20 %, увеличение внутреннего сопротивления с 0,15 до 0,20 Ом) время разряда исследуемой

сборки уменьшается на 6,9 % по сравнению с эталонной. Различие между напряжениями исследуемой и эталонной батареи составляет 4,9 %, при прогрессировании деградации оно увеличивается до 10,5 %. Если сравнивать напряжение дефектной АКБ и последовательно включенной, то при деградации разница между ними возрастает с 10,3 до 23,4%. Потери мощности в дефектной АКБ увеличиваются при этом на 20 %.

Моделирование параллельно-последовательной сборки аккумуляторной батареи

Схема параллельно-последовательной сборки четырех АКБ представлена на рис. 4.

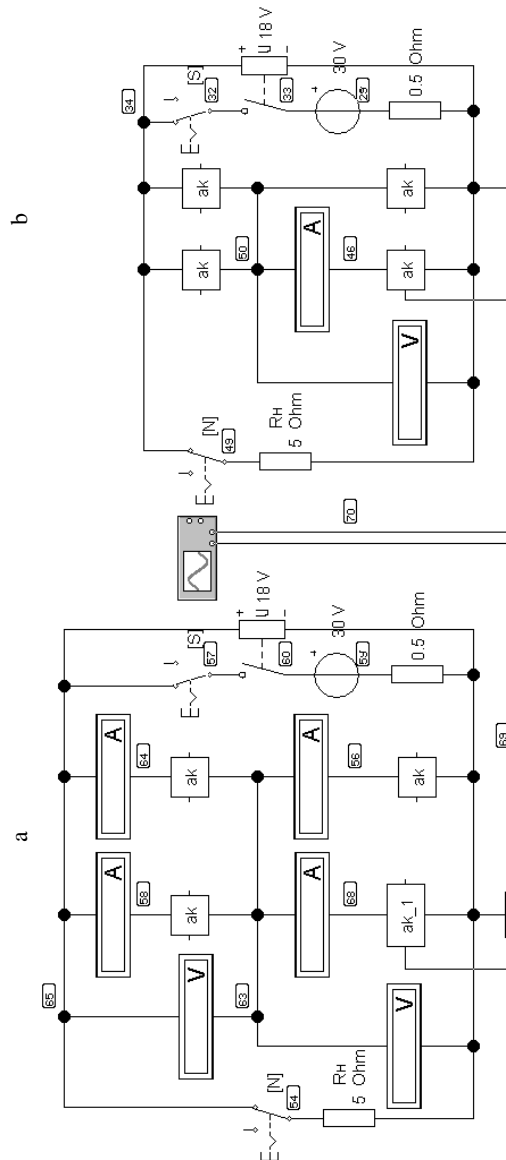


Рис. 4. Параллельно-последовательная сборка четырех аккумуляторных батарей:
а – с дефектной батареей; б – эталонная

Fig. 4. Parallel-series connection of four batteries:
a – connection under study; b – reference connection

Временные диаграммы состояния заряда в ходе зарядно-разрядного циклирования исправной АКБ в эталонной сборке и дефектной АКБ в тестируемой представлены на рис. 5.

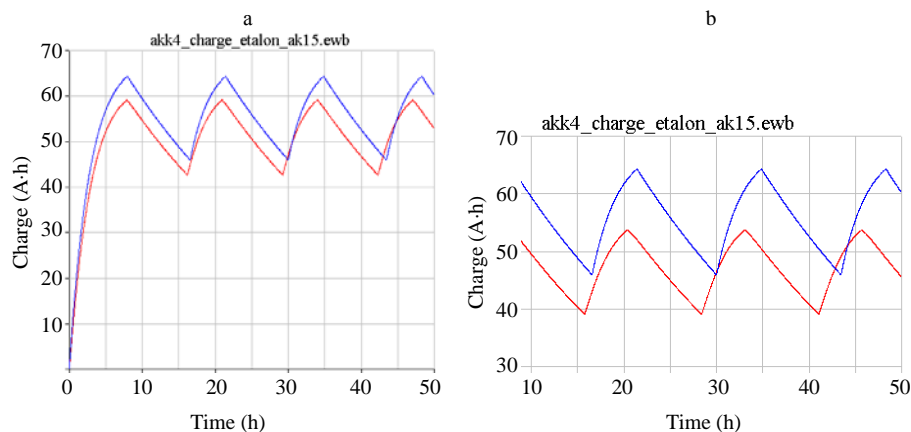


Рис. 5. Временная диаграмма состояния заряда исправной батареи (синяя линия) в эталонной сборке и дефектной батареи (красная линия): а – с первоначальной деградацией параметров; б – с учетом деградации параметров со временем

Fig. 5. Timing diagram of charge of an operable battery (blue line) in the reference assembly and a defective battery (red line): а – when the parameters are degraded initially; б – taking into account the degradation of parameters over time

Уменьшение емкости на 10 % и увеличение внутреннего сопротивления (с 0,10 до 0,15 Ом) дефектной АКБ приводят к сокращению времени разряда исследуемой сборки на 3,2 % по сравнению с эталонной. При дальнейшей деградации (снижение емкости на 20 %, увеличение внутреннего сопротивления с 0,15 до 0,20 Ом) время разряда тестируемой сборки уменьшается на 6,4 % по сравнению с эталонной. Изменение параметров зарядного устройства и нагрузки для разряда АКБ не выявило существенного влияния на указанные процентные соотношения.

Различие между напряжениями исследуемой и эталонной батарей составляет 3,0 %, при прогрессировании деградации оно увеличивается до 6,3 %. Если сравнивать напряжения дефектной АКБ и последовательно включенной, то при деградации разница между ними возрастает с 5,0 до 10,4 %. Потери мощности в дефектной АКБ увеличиваются при этом на 12,2 %.

Переключение сборки с последовательно-параллельного соединения в параллельно-последовательное

При сохранении всех параметров моделирования и применении метода подобия [10] в схему добавлен ключ для перекоммутирования АКБ (рис. 6), замыкающийся через 25 ч после начала подключения сборки в цикл «заряд – разряд». Среди исправных АКБ (подцепи ак) имеется одна дефектная батарея (подцепь ак_1) с емкостью на 10 % меньше и внутренним сопротивлением на 50 % больше, чем у исправных АКБ.

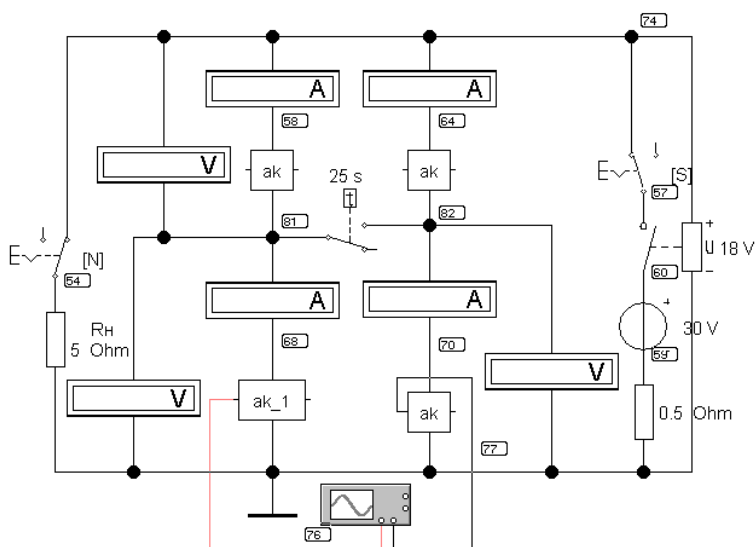


Рис. 6. Переключение сборки с последовательно-параллельного соединения в параллельно-последовательное

Fig. 6. Switching from serial-parallel connection to parallel-serial one

Временная диаграмма состояния заряда дефектной АКБ при подключении к ней параллельно исправной АКБ в ходе зарядно-разрядного циклирования представлена на рис. 7. Ключ подключает исправную АКБ через 25 ч и отключает через 28 ч.

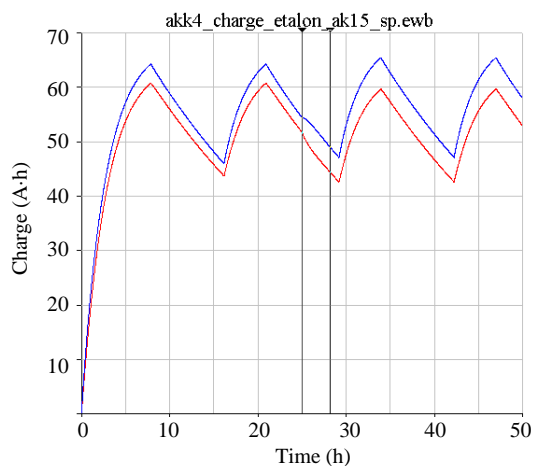


Рис. 7. Временная диаграмма состояния заряда исправной (синяя линия) и дефектной (красная линия) батарей, подключаемых параллельно

Fig. 7. Timing diagram of charge of an operable battery (blue line) connected in parallel with a defective battery (red line)

Из-за выравнивания напряжений при подключении исправной АКБ происходят перераспределение зарядов и броски токов. Причем это не ве-

дет к увеличению емкости дефектной АКБ. В расчетах для других временных параметров переключений (менялись моменты включения-выключения) проявляется та же тенденция. Дальнейшая деградация параметров АКБ приводит лишь к более резким скачкам напряжения, заряда и тока. Таким образом, переключение сборки с последовательно-параллельным соединением в параллельно-последовательное не приводит к компенсации деградации параметров АКБ.

Моделирование параллельно-последовательной сборки четырех аккумуляторных батарей с дополнительной подпиткой дефектной батареи

Подпитка энергией дефектной батареи в параллельно-последовательной сборке реализуется подключением дополнительного источника постоянного тока параллельно с деградировавшей АКБ (рис. 8).

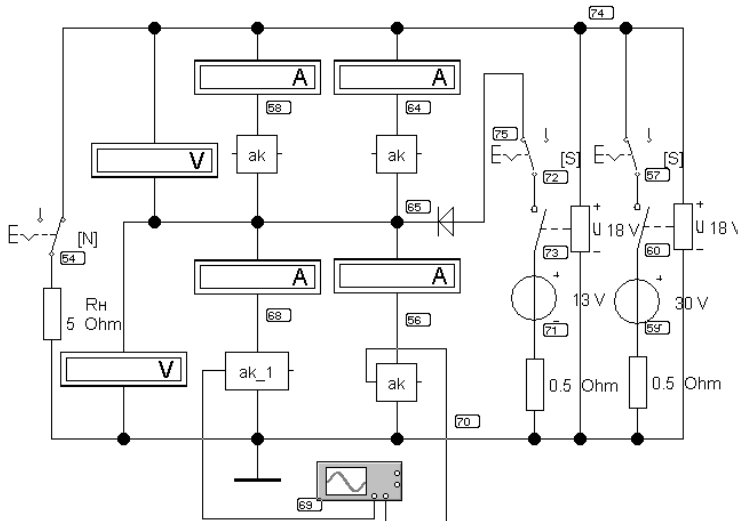


Рис. 8. Параллельно-последовательное соединение аккумуляторных батарей с цепями подпитки

Fig. 8. Parallel-serial connection of the battery with recharge circuits

Изменение заряда дефектной и исправной АКБ, подключенных параллельно, показано на рис. 9 для трех случаев подпитки энергией. Представленные зависимости показывают, что дополнительная подпитка энергией дефектной АКБ поддерживает работоспособность всей сборки. Увеличение энергии подпитки повышает напряжение и заряд АКБ. Подпитка может быть выполнена подключением параллельно с дефектной дополнительной батареи или конденсатора, что равносильно замене деградировавшей АКБ на новую. Поэтому актуальным остается поиск дефектной АКБ в сборке, например путем применения индикаторов и электронных схем контроля разряда батарей.

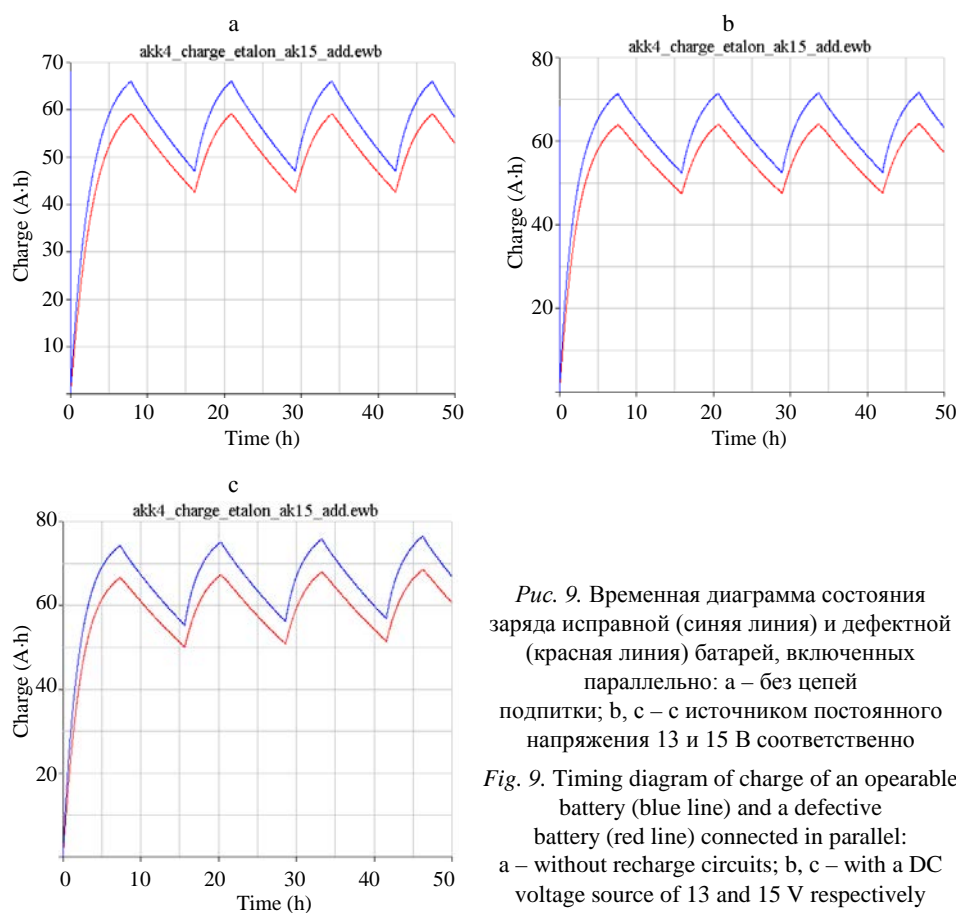


Рис. 9. Временная диаграмма состояния заряда исправной (синяя линия) и дефектной (красная линия) батарей, включенных параллельно: а – без цепей подпитки; б, с – с источником постоянного напряжения 13 и 15 В соответственно

Fig. 9. Timing diagram of charge of an opearable battery (blue line) and a defective battery (red line) connected in parallel: а – without recharge circuits; б, с – with a DC voltage source of 13 and 15 V respectively

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа параллельно-последовательного и последовательно-параллельного соединений батарей предпочтительным признан первый способ. Для сборки с параллельно-последовательным соединением временные параметры работы остались практически неизменными, однако различия в напряжениях дефектной и других батарей изменились более чем в два раза по сравнению с последовательно-параллельным соединением. Потери мощности в дефектной батарее при параллельно-последовательной сборке снизились на 16,5 %.

2. При переключении сборки с последовательно-параллельным соединением на параллельно-последовательное из-за выравнивания напряжений при подключении исправной батареи происходят перераспределение зарядов и броски токов. К увеличению емкости дефектной батарее это не ведет. Такая тенденция сохраняется и с изменением параметров работы ключа. Дальнейшая деградация параметров батарей приводит лишь к более резким скачкам напряжения, заряда и тока. Таким образом, переключение сборки с последова-

тельно-параллельным соединением в параллельно-последовательное не приводит к компенсации деградации параметров батареи.

3. Дополнительная подпитка энергией дефектной батареи поддерживает работоспособность всей сборки. Увеличение энергии подпитки повышает напряжение и заряд батареи. Подпитка может быть выполнена подключением параллельно с дефектной дополнительной батареей или конденсатора, что равносильно замене деградировавшей батареи на новую. Таким образом, актуальным остается поиск дефектной батареи в сборке, например путем применения индикаторов и электронных схем контроля разряда батарей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge / C. M. Shepherd // *Journal of Electrochemical Society*. 1965. Vol. 112, Iss. 7. P. 657–664. <https://doi.org/10.1149/1.2423659>.
2. Tremblay, O. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications / O. Tremblay, L.-A. Dessaint // *World Electric Vehicle Journal*. 2009. Vol. 3, Iss. 2. P. 289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>.
3. Krasucki, J. Projektowanie Hybrydowych Elektro-Hydraulicznych Układów Napędowych / J. Krasucki, A. Rostowski. Radom, 2010.
4. Фоменко, Н. С. Особенности моделирования свинцово-кислотного аккумулятора / Н. С. Фоменко, А. С. Григорьев, А. С. Динисиллов // *Электрохимическая энергетика*. 2019. Т. 19, № 2. С. 81–89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89>.
5. Пост, С. С. Имитационная электроэнергетическая модель литий-ионной аккумуляторной батареи [Электронный ресурс] / С. С. Пост, В. И. Иванчура // Молодежь и наука: сб. материалов IX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s044/s044-040.pdf>. Дата доступа: 10.07.2019.
6. Борисевич, А. В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния [Электронный ресурс] / А. В. Борисевич // *Современная техника и технологии*. 2014. № 5. Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542>. Дата доступа: 12.04.2020.
7. Сазанов, А. Б. Математическое моделирование режимов работы аккумуляторных батарей / А. Б. Сазанов // *Техника машиностроения*. 2007. № 2. С. 27–30.
8. Мартянов, А. С. Моделирование алгоритмов заряда аккумуляторной батареи [Электронный ресурс] / А. С. Мартянов // *Наука ЮУрГУ: материалы 67-й науч. конф. Секция техн. наук*. 2015. С. 1165–1171. Режим доступа: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/6376/44.pdf?sequence=1>. Дата доступа: 12.04.2020.
9. Гринчик, Н. Н. Об измерении электрического сопротивления жидких электролитов аккумуляторных батарей / Н. Н. Гринчик, К. В. Доброго, М. А. Чумаченко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 494–507. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-494-507>.
10. Доброго, К. В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров / К. В. Доброго, Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.
11. Карлашук, В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MatLab / В. И. Карлашук. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 800 с.
12. Бладыко, Ю. В. *Электроника* / Ю. В. Бладыко. Минск: ИВЦ Минфина, 2016. 190 с.

Поступила 18.12.2020 Подписана в печать 23.02.2021 Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. Shepherd C. M. (1965) Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge. *Journal of Electrochemical Society*, 112 (7), 657–664. <https://doi.org/10.1149/1.2423659>.
2. Tremblay O., Dessaint L.-A. (2009) Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3 (2), 289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>.
3. Krasucki J., Rostowski A. (2010) *Projektowanie Hybrydowych Elektro-Hydraulicznych Układów Napędowych*. Radom.
4. Fomenko N. S., Grigoriev A. S., Dinisilov A. S. (2019) Specific Features of Lead-Acid Battery Modelling. *Electrokhimicheskaya Energetika = Electrochemical Energetics*, 19 (2), 81–89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89> (in Russian).
5. Post S. S., Ivanchura V. I. (2013) Simulation Electric Power Model of a Lithium-Ion Battery. *Molodezh' i Nauka: Sb. Materialov IX Vseros. Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh s Mezhdunar. Uchastiem, Posvyashchennoi 385-letiyu so Dnya Osnovaniya g. Krasnoyarska* [Youth and Science: a Collection of Materials of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists with International Participation Dedicated to the 385th Anniversary of the Founding of the City of Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s044/s044-040.pdf> (Accessed 10 July 2019) (in Russian).
6. Borisevich A. V. (2014) Modeling of Lithium-Ion Batteries for Battery Management Systems: the Survey of Current State. *Sovremennaya Tekhnika i Tekhnologii = Modern Techniques and Technologies*, (5). Available at: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (Accessed 12 April 2020) (in Russian).
7. Sazanov A. B. (2007) Mathematical Modeling of Battery Operating Conditions. *Tekhnika Mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Technologies], (2), 27–30 (in Russian).
8. Mart'yanov A. S. (2015) Modeling of Rechargeable Battery Charge Algorithms. *Nauka YuUrGU: Materialy 67-i Nauch. Konf. Sektsii Tekhnicheskikh Nauk* [SUSU Science: Proceedings of the 67th Scientific Conference. Section of Technical Sciences], 1165–1171. Available at: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/6376/44.pdf?sequence=1> (Accessed 12 April 2020) (in Russian).
9. Grinchik N. N., Dobrego K. V., Chumachenko M. A. (2018) On the Measurement of Electric Resistance of Liquid Electrolytes of Accumulator Battery. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 494–507. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-494-507> (in Russian).
10. Dobrego K. V., Bladyko Y. V. (2021) Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39> (in Russian).
11. Karlashchuk V. I. (2004) *IBM PC-Based Electronic Laboratory. Laboratory Workshop Based on Electronics Workbench and MatLab*. Moscow, SOLON-Press Publ. 800 (in Russian).
12. Bladyko Y. V. (2016) *Electronics*. Minsk, ICC of the Ministry of Finance Publ. 190 (in Russian).

Received: 18 December 2020 Accepted: 23 February 2021 Published online: 30 September 2021