

УДК 621.355.9

DOI 10.46960/2658-6754_2023_4_31

РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Д.А. АлешинORCID: 0000-0003-0513-051X e-mail: dmitriy.aleshin.nn@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***А.В. Шалухо**ORCID: 0000-0002-8235-0658 e-mail: shaluho@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***М.К. Ешаев**ORCID: 0009-0000-9954-1947 e-mail: maksat.eshaev@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***Н.М. Петухов**ORCID: 0000-0002-7682-4917 e-mail: petunikolai@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

В настоящее время актуальной задачей является повторное использование аккумуляторных батарей. При этом сложность заключается в оценке остаточного ресурса элементов аккумуляторов. Статья посвящена разработке испытательного стенда для выполнения построения зарядно-разрядных характеристик серийно выпускаемых аккумуляторных батарей для последующей оценки их остаточного ресурса. Приведены структурная схема, основные параметры и функциональные возможности стенда. Особенностью является программное обеспечение собственной разработки, позволяющее автоматизировать процесс исследований. Представлены полученные с помощью стенда результаты исследований литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей. Развитие работы связано с разработкой методических рекомендаций по вторичному использованию аккумуляторных батарей различных типов.

Ключевые слова: аккумуляторные батареи, зарядно-разрядные характеристики, испытательный стенд, остаточный ресурс, повторное использование, состояние заряда.

Для цитирования: Алешин Д.А., Шалухо А.В., Ешаев М.К., Петухов Н.М. Разработка испытательного стенда и исследование характеристик серийно выпускаемых литиевых аккумуляторных батарей // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 31-42. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_31

DEVELOPMENT OF A TEST BENCH AND CHARACTERISTICS RESEARCH OF SERIALLY PRODUCED BATTERIES

D.A. Aleshin

ORCID: **0000-0003-0513-051X** e-mail: **dmitriy.aleshin.nn@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Shalukho

ORCID: **0000-0002-8235-0658** e-mail: **shaluho@nntu.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.K. Yeshaev

ORCID: **0009-0000-9954-1947** e-mail: **maksat.eshaev@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

N.M. Petukhov

ORCID: **0000-0002-7682-4917** e-mail: **petunikolai@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Battery reuse is an urgent task in a nowadays power industry. The difficulty lies in estimating the remaining life of battery cells. The article is devoted to the development of a test bench for carrying out formation of the charge-discharge characteristics of commercially produced batteries to assess their residual life. The block diagram, main parameters and functionality of the stand are given. A special feature is proprietary software that allows you to automate the research process. The results of studies of lithium iron phosphate batteries obtained using the stand are presented. The future work is associated with the development of methodological recommendations for the recycling of various types of batteries.

Keywords: batteries, charge-discharge characteristics, test bench, residual life, reuse, state of charge.

For citation: D.A. Aleshin, A.V. Shalukho, M.K. Yeshaev and N.M. Petukhov, "Development of a test bench and characteristics research of serially produced batteries", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 31-42, 2023.

DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_31

1. Введение

В настоящее время в устройствах и системах с накопителями электрической энергии широко используются перезаряжаемые гальванические элементы (ГЭ) различных типов [1, 2], объединяемые в аккумуляторные батареи (АКБ). Среди ГЭ можно выделить литиевые элементы, которые характеризуются большой удельной мощностью и малыми токами утечки [3, 4], вследствие чего находят частое применение в электротранспорте и портативных устройствах.

Однако серьезной проблемой применения АКБ, в том числе, на основе литиевых ГЭ, является ограничение их ресурса, который в среднем составляет от 1 до 10 тыс. циклов *заряд/разряд* [5]. При этом циклируемость АКБ снижается при нарушении рекомендуемых условий эксплуатации (например, при потреблении от АКБ токов, превышающих номинальные значения, или эксплуатации при температурах, не соответствующих рабочему диапазону). Следствием истощения ресурса АКБ является уменьшение ее энергоемкости. Однако АКБ сохраняет функцию накопления и отдачи электрической энергии, что предоставляет возможность и делает актуальной задачу вторичного использования аккумуляторов [6-8].

Вторичное использование предполагает внедрение аккумулятора, истощившего свой ресурс в ходе эксплуатации, в устройство или систему, которые не требуют наличия значительной удельной энергии накопителя. Вторичное использование АКБ тесно связано с электротранспортной отраслью [9, 10]. Так, запас хода электромобиля снижается пропорционально остаточной емкости, используемой в нем АКБ. При замене отработанные АКБ могут быть вторично использованы, например, в стационарных системах накопления, для которых не критичны повышенные массогабаритные показатели. Также вторично используемые АКБ могут найти применение в устройствах для питания импульсных нагрузок и системах для сглаживания графика энергопотребления в течении суток [11].

Важной задачей при вводе в эксплуатацию вторично используемых аккумуляторов является их диагностика для корректировки электрической емкости и прогнозирования ее изменения при использовании [12]. На базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработан испытательный стенд, предназначенный для диагностики аккумуляторных батарей (как новых серийно выпускаемых, так и вторично используемых) и оценки их остаточного ресурса.

II. Структура испытательного стенда

Структурная схема испытательного стенда для исследования параметров АКБ и его внешний вид представлены на рис. 1. Обозначения на рис. 1: ЗУ – зарядное устройство; Н – электронная нагрузка; К – контроллер для обработки измерений; ПК – персональный компьютер.

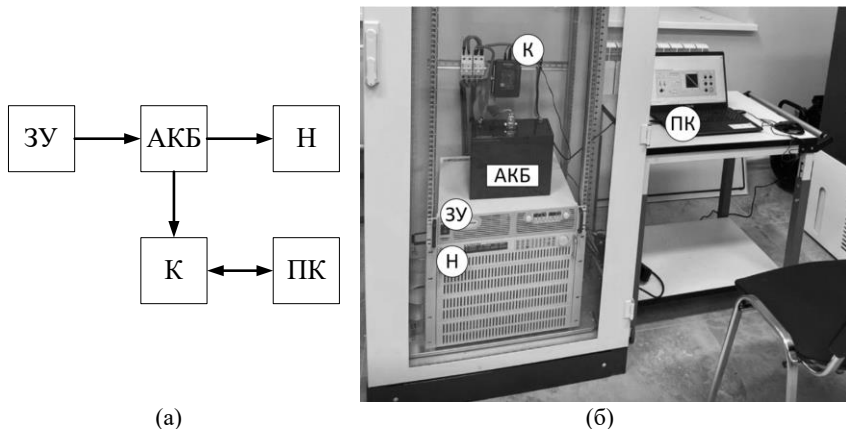


Рис. 1. Испытательный стенд для исследования параметров АКБ: структура (а); внешний вид (б)

Fig. 1. Test bench for determining the batteries parameters: structure (a); appearance (б)

В испытательном стенде в качестве зарядного устройства использован лабораторный источник питания. Контроллер предназначен для обработки измеренных значений напряжения и температуры ГЭ. Передача данных с контроллера оператору осуществляется с помощью персонального компьютера. Изменение режима исследований (с разряда на заряд и наоборот) выполняется коммутационными устройствами.

При разработке испытательного стенда были заданы предельные параметры исследуемых аккумуляторных батарей:

- 1) количество последовательно соединенных элементов в батарее – 6;
- 2) максимальное напряжение батареи – 20 В;
- 3) максимальный ток заряда – 20 А;
- 4) максимальный ток разряда – 30 А.

Для автоматизации процессов проведения исследований и обработки данных разработана специальная программа и дизайн панели оператора. Панель оператора состоит из двух окон и позволяет задать текущий режим работы, а также осуществить запуск программы, которая фиксирует состояние заряда, значения напряжения ГЭ и температуры АКБ.

Основное окно панели оператора предназначено для выбора основных параметров АКБ (номинальная емкость АКБ, режим задания зарядного/разрядного тока, режим работы батареи) и запуска процесс измерения параметров (рис. 2).

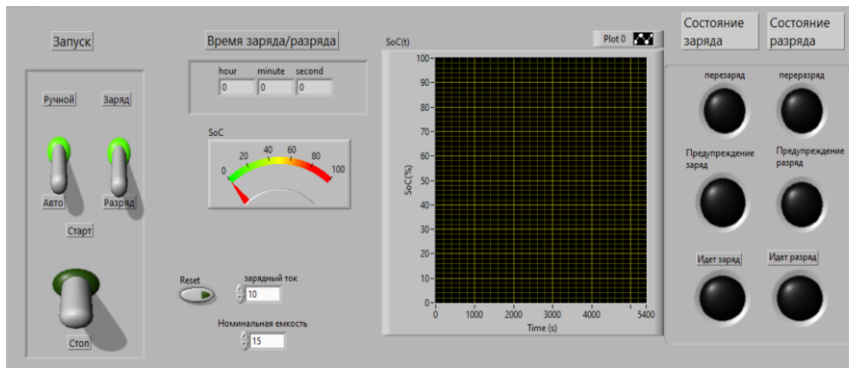


Рис. 2. Окно панели оператора испытательного стенда

Fig. 2. Test bench operator panel window

Значения токов заряда и разряда могут быть заданы автоматически или вручную. Ручной режим возможен только при использовании зарядного устройства и электронной нагрузки с функцией стабилизации генерируемого/потребляемого тока. На основании величины тока происходит расчет состояния заряда батареи с помощью закона Фарадея. Однако, для получения более точных данных в ходе эксплуатации батареи требуется ввод в работу либо полностью заряженной, либо полностью разряженной батареи. Также недостатком метода является невозможность оценить состояния заряда каждого элемента в составе АКБ.

Исходя из выбранного режима измерений (заряд или разряд АКБ), изменяется вид графика зависимости уровня заряда АКБ от времени ($SoC(t)$).

В ходе работы АКБ индицируются следующие параметры:

- 1) текущее время работы АКБ;
- 2) текущий уровень состояния заряда (SoC) АКБ;
- 3) наличие заряда/разряда АКБ;
- 4) наличие перезаряда/переразряда АКБ.

Индикация наличия перезаряда/переразряда основана на сравнении величины напряжения каждого аккумуляторного элемента с его минимальным/максимальным значением, которое задается индивидуально для каждого типа АКБ. При наличии перезаряда или переразряда оператор должен произвести отключение зарядного устройства или нагрузки.

Дополнительное окно панели оператора отображает: мгновенные значения напряжения элементов, среднее значение напряжения элементов и текущую температуру в двух точках АКБ (рис. 3).

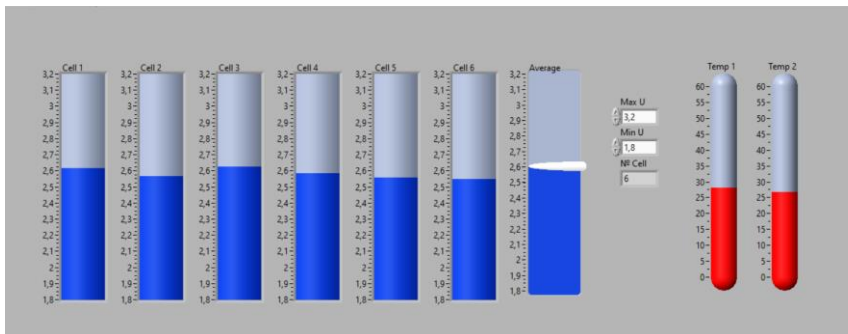


Рис. 3. Окно для индикации напряжения аккумуляторных элементов и температуры АКБ

Fig. 3. Window for indicating battery cell voltage and battery temperature

Поскольку максимальное количество входных каналов АЦП для контроллера равно 8, дополнительно были использованы переходные платы, содержащие АЦП с выходным цифровым интерфейсом и делителями напряжения, что позволило увеличить количество исследуемых элементов в составе АКБ.

Измерение напряжения на элементах АКБ выполняется по алгоритму, представленному на рис. 4. Его суть заключается в следующем. Вначале производится инициализация протокола приема-передачи данных и всех используемых переменных. Далее выполняется последовательных опрос каналов микросхем АЦП, полученные данные записываются в массив. Нулевые значения сформированного массива исключаются, и на следующем этапе рассчитываются значения напряжения каждого элемента батареи по формуле (1).

$$U_{cell}(n) = n * U_{ADC}(n) - (n-1) * U_{ADC}(n-1), \quad (1)$$

где n – порядковый номер элемента; U_{ADC} – величина измеренного напряжения; U_{cell} – напряжение аккумуляторного элемента.

Следующим пунктом рассчитывается среднее напряжение аккумуляторных элементов для определения перезаряженных и недозаряженных элементов. Все расчетные величины выводятся на панель оператора (рис. 3) и отображаются в виде графиков.

Для развития функциональных возможностей испытательного стенда предполагается внедрить:

1) автоматический запуск и автоматическое определения режима работы АКБ за счет измерения направления протекаемого тока;

2) определение состояния заряда аккумуляторных ячеек за счет сравнения напряжения элемента с данными о величине заряда АКБ, записанными в переходные таблицы (*Lookup Table*).

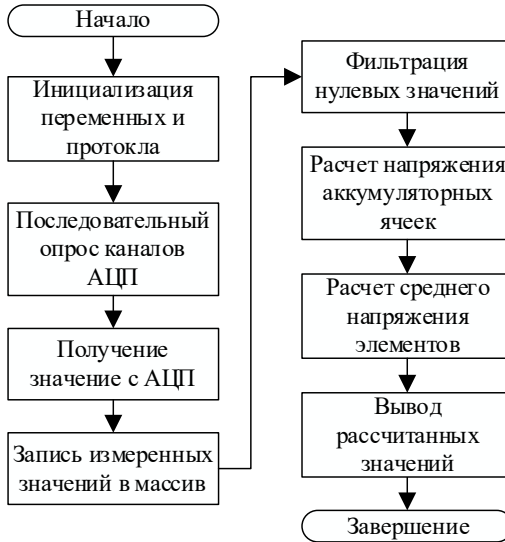


Рис. 4. Блок-схема алгоритма измерения напряжения на аккумуляторных элементах

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for measuring voltage on battery cells

III. Результаты исследований характеристик аккумуляторных батарей

С помощью разработанного испытательного стенда выполнены исследования характеристик серийно выпускаемых АКБ трех типов: никель-металлгидридных (*Ni-MH*), литий-железо-фосфатных (*LiFePO₄*) и литий-титанатных (*LTO*). Паспортные данные исследуемых АКБ приведены в табл. 1.

В процессе исследований были построены зарядно-разрядные характеристики аккумуляторных элементов и получены данные об изменении их температуры в двух точках (в месте контактов и в середине аккумуляторной сборки).

Пример зарядной характеристики литий-железо-фосфатного аккумулятора (*LiFePO₄*) приведен на рис. 5.

Таблица 1.
 Параметры исследуемых аккумуляторных батарей

Table 1.
 Parameter of research batteries

| Типы АКБ | <i>Ni-MH</i> | <i>LiFePO4</i> | <i>LTO</i> |
|---------------------------------|--------------|----------------|------------|
| Номинальное напряжение, В | 1,2 | 3,2 | 2,4 |
| Емкость, Ач | 10 | 15 | 15 |
| Максимальный ток разряда, А | 9,5 | 30 | 90 |
| Максимальный ток заряда, А | 2,85 | 15 | 75 |
| Минимальное напряжение, В | 1,0 | 2,0 | 1,5 |
| Максимальное напряжение, В | 1,4 | 3,6 | 2,8 |
| Диапазон рабочих температур, °С | 0 ~ +50 | -30 ~ +60 | -20 ~ +65 |
| Циклируемость | 1000 | 2000 | 4000 |

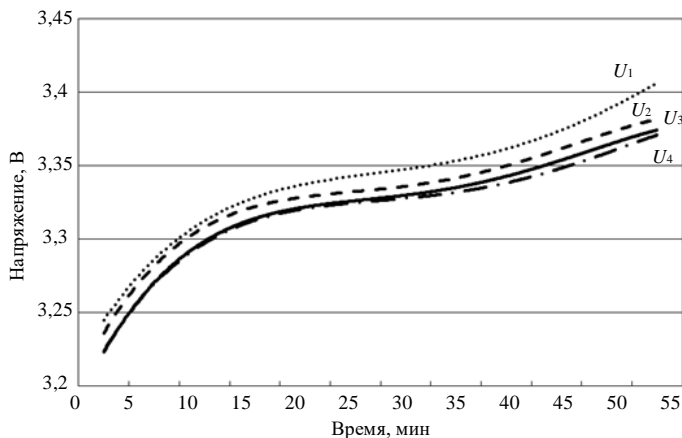


Рис. 5. Зарядная характеристика *LiFePO4* аккумуляторных элементов

Fig. 5. Charging characteristics of *LiFePO4* battery cells

Заряд АКБ производился током 15 А до уровня 90 %. Полученные данные соответствуют паспортной характеристике. В конце заряда разбаланс составил 40 мВ, что является приемлемой величиной для аккумуляторных накопителей общего назначения, но не для энергоемких систем, эксплуатируемых при максимально допустимых параметрах. В этом случае при увеличении напряжения потребуются дополнительные системы балансировки и контроля состояния батареи.

IV. Заключение

Одна из важных задач современной энергетики связана с возможностью вторичного использования аккумуляторных батарей. На базе НГТУ разработан испытательный стенд для определения параметров аккумуляторных батарей, позволяющий получить зарядно-разрядные характеристики для оценки остаточного ресурса.

Разрядно-зарядные характеристики серийно выпускаемых аккумуляторов, полученные посредством применения испытательного стенда при его отладке, соответствуют паспортным, что подтверждает правильность отладки элементов измерения.

Предполагается расширение функциональных возможностей испытательного стенда за счет добавления функции определения величины заряда аккумулятора на основании переходных таблиц, автоматического запуска и определения режима работы батареи.

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема № FSWE-2022-0006).

© Алешин Д.А., 2023

© Шалухо А.В., 2023

© Ешаев М.К., 2023

© Петухов Н.М., 2023

Поступила в редакцию 15.11.2023

Принята к публикации 25.11.2023

Received 15.11.2023

Accepted 25.11.2023

Библиографический список

- [1] Фисенко О.Б., Кубриков М.В. Обзор накопителей (аккумуляторов) энергии // Актуальные Проблемы Авиации и Космонавтики. 2013. Т. 1. № 9. С. 104-105.
- [2] Zyryanov V., Kiryanova N., Korotkov I., Nesterenko G., Prankevich G., Rudiuk I. Analysis of energy storage systems application in the Russian and world electric power industry // 2020 Ural Smart Energy Conference USEC 2020, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia: IEEE, 2020. P. 106-109.
DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281175
- [3] Фатыхов Р.Р., Хантимеров С.М., Сулейманов Н.М. Перспективы применения литий-ионных аккумуляторов в качестве резервных источников питания на электрических станциях // Вестник КГЭУ. 2017. № 4(36). С. 45-53.
- [4] Пехотиков В.А., Смелков Г.И., Рябиков А.И., Назаров А.А., Грузинова О.И. Состояние, перспективы и проблемы применения литий-ионных аккумуляторов // Сборник материалов Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы совер-

- шенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов», Апрель 20, 2021, Иваново, Россия: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. С. 251-255.
- [5] Chen C., Chen B., Wang T., Zheng J., Lin Z. Battery health assessment and life prediction in battery management system // 2022 3rd International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (IWEC AI), Jan. 14-16, 2022, Zhuhai, China: IEEE, 2022. P. 87-90. DOI: 10.1109/IWEC AI55315.2022.00025
- [6] Jie W., Hua L., Peijie C., Deyu Q., Shan L. Design of energy storage system using retired valve regulated lead acid (VRLA) batteries in substations // 2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Oct. 16-17, 2019, Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2019. P. 132-136. DOI: 10.1109/CENCON47160.2019.8974821
- [7] Iliés A.I., Ciascai I., Pitica D. Methods for reusing Li-Ion cells from discarded battery packs // 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), May 15-19, 2019, Wroclaw, Poland: IEEE, 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810304
- [8] Matsuda Y., Tanaka K. Reuse EV battery system for renewable energy introduction to island powergrid // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe), Jun. 06-09, 2017, Milan, Italy: IEEE, 2017. P. 1-6. DOI: 10.1109/IEEEIC.2017.7977561
- [9] Muhammad M., Ahmeid M., Attidekou P.S., Milojevic Z., Lambert S., Das P. Assessment of spent EV batteries for second-life application // 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), Nov. 25-28, 2019, Singapore, Singapore: IEEE, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/IFEEEC47410.2019.9015015
- [10] Tong S., Fung T., Park J.W. Reusing electric vehicle battery for demand side management integrating dynamic pricing // 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Nov. 02-05, 2015, Miami, FL, USA: IEEE, 2015. P. 325-330. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2015.7436321
- [11] Keeli A., Sharma R.K. Optimal use of second life battery for peak load management and improving the life of the battery // 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, Mar. 04-08, 2012, Greenville, SC, USA: IEEE, 2012. P. 1-6. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183276
- [12] Sundaresan S., Sunil S., Balasingam B., Pattipati K.R. Fast offline battery capacity estimation approach with performance bounds // 2022 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Dec. 05-07, 2022, Victoria, BC, Canada: IEEE, 2022. P. 188-193. DOI: 10.1109/EPEC56903.2022.10000219

References

- [1] O.B. Fisenko and M.V. Kubrikov, "Obzor nakopitelej (akkumulyatorov) energii [Overview of energy storage (accumulators)]", *Aktual'nye Problemy Aviacii i Kosmonavтики [Current Problems of Aviation and Astronautics]*, vol. 1, no. 9, pp. 104-105, 2013 (in Russian).
- [2] V. Zyryanov, N. Kiryanova, I. Korotkov, G. Nesterenko, G. Prankevich and I. Rudiuk, "Analysis of energy storage systems application in the Russian and world electric

- power industry”, in proc. *2020 Ural Smart Energy Conference USEC 2020*, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 106-109.
DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281175
- [3] R.R. Fatykhov, S.M. Khantimerov and N.M. Suleimanov, “Prospects for the use of lithium-ion batteries as standby power sources in electric power stations”, *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, no. 4 (36), pp. 45-53, 2017.
- [4] V.A. Pehotikov, G.I. Smelkov, A.I. Ryabikov, A.A. Nazarov and O.I. Gruzina, “State, prospects and problems of application lithium - ion batteries”, in proc. *Aktual'nye Voprosy Sovershenstvovaniya Inzhenernyh Sistem Obespecheniya Pozharnoj Bezopasnosti Ob'Ektov [Current Issues in Improving Engineering Systems for Ensuring fire Safety of Facilities]*, Apr. 20, 2021, Ivanovo, Russia, pp. 251-255.
- [5] C. Chen, B. Chen, T. Wang, J. Zheng and Z. Lin, “Battery health assessment and life prediction in battery management system”, in proc. *2022 3rd International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (IWEC AI)*, Jan. 14-16, 2022, Zhuhai, China, pp. 87-90. DOI: 10.1109/IWEC AI5315.2022.00025
- [6] W. Jie, L. Hua, C. Peijie, Q. Deyu and L. Shan, “Design of energy storage system using retired valve regulated lead acid (VRLA) batteries in substations”, in proc. *2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, Oct. 16-17, 2019, Yogyakarta, Indonesia, pp. 132-136. DOI: 10.1109/CENCON47160.2019.8974821
- [7] A.I. Iliés, I. Ciascai and D. Pitica, “Methods for reusing Li-Ion cells from discarded battery packs”, in proc. *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, May 15-19, 2019, Wroclaw, Poland, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810304
- [8] Y. Matsuda and K. Tanaka, “Reuse EV battery system for renewable energy introduction to island powergrid”, in proc. *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Jun. 06-09, 2017, Milan, Italy, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977561
- [9] M. Muhammad, M. Ahmeid, P.S. Attidekou, Z. Milojevic, S. Lambert and P. Das, “Assessment of spent EV batteries for second-life application”, in proc. *2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, Nov. 25-28, 2019, Singapore, Singapore, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IFEEC47410.2019.9015015
- [10] S. Tong, T. Fung and J.W. Park, “Reusing electric vehicle battery for demand side management integrating dynamic pricing”, in proc. *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Nov. 02-05, 2015, Miami, FL, USA, pp. 325-330. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2015.7436321
- [11] A. Keeli and R.K. Sharma, “Optimal use of second life battery for peak load management and improving the life of the battery”, in proc. *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, Mar. 04-08, 2012, Greenville, SC, USA, pp. 1-6. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183276
- [12] S. Sundaresan, S. Sunil, B. Balasingam and K.R. Pattipati, “Fast offline battery capacity estimation approach with performance bounds”, in proc. *2022 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Dec. 05-07, 2022, Victoria, BC, Canada, pp. 188-193. DOI: 10.1109/EPEC56903.2022.10000219

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Алешин Дмитрий Александрович, старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Dmitry A. Aleshin, senior lecturer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Шалухо Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Andrey V. Shalukho, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Ешаев Максат Какаджанович, инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Maksat K. Yeshaev, engineer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Петухов Николай Михайлович, инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Nikolai M. Petukhov, engineer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.