

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА БАЛАНСИРОВКИ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

к.ф.-м.н. **Зуев С.М.**, **Алексюк М.Р.**, **Канарейкин А.И.**, **Хабарова С.Д.**, **Богачев С.А.**
Московский политехнический университет, Москва, Россия
KnSalex@yandex.ru

В данной статье рассматривается проблема балансировки в процессе зарядки литий-ионных аккумуляторов конфигурации 4S и метод ее решения с помощью зарядной станции нового типа. В качестве рабочего образца использовался 4-ячейстый «умный» аккумуляторный блок. Показаны преимущества использования пассивного метода балансировки по сравнению с активным.

Разработанный коллективом авторов макет системы управления аккумуляторной батареей BMS позволяет контролировать физические параметры на ячейках батареи и производить балансировку, увеличивая срок службы и безопасность работы аккумулятора. Система управления батареей BMS позволяет контролировать параметры заряжаемой ячейки или аккумуляторной батареи, защищая их от работы в опасной зоне, а также считывая второстепенные данные посредством встроенной системы управления и анализа на основе микроконтроллера ATmega328. Система управления может контролировать состояние батареи, которое представлено различными параметрами, такими как напряжение, температура, состояние заряда SOC, «состояние здоровья» SOH, ток. Могут быть исследованы аккумуляторные батареи с произвольным числом последовательно и параллельно-последовательно соединенных ячеек батареи.

В ходе проведенных исследований были получены графические зависимости заряда ячеек аккумулятора без использования системы BMS и при использовании данной системы, которые позволяют провести анализ технических характеристик батареи и в дальнейшем выработать предложения по их безопасным режимам работы.

Применение предложенной системы BMS для увеличения срока службы литий-ионных батарей возможно во многих сферах производства. В связи с большим распространением литий-ионных батарей от бытовой электроники до транспортных средств, данная разработка является актуальной в рамках современной технологии электрооборудования.

Ключевые слова: литий-ионная батарея, зарядное устройство, пассивная балансировка.

Введение

В настоящее время бурное развитие рынка литий-ионных аккумуляторов (исходя из оценки Verenberg данному сектору промышленности требуется увеличить выпуск аккумуляторов с 68 ГВт ч в 2016 г. до 1165 ГВт ч в 2026 г. [1]) приводит к проблеме совершенствования технологии автономных источников питания для транспорта, чему посвящено значительное количество работ [2–5]. Это находит отклик в том числе и в образовательной среде в рамках проектной работы студентов и аспирантов [6]. Результатом является активное развитие данного направления исследований, в том числе анализ структуры системы управления и разработка алгоритма заряда аккумуляторной батареи, которые обеспечивают оптимальное соотношение времени ее разряда и временных затрат на процесс зарядки и балансировки.

Цель исследования

Обеспечение балансировки в процессе зарядки литий-ионных аккумуляторов конфигурации 4S и метод ее решения с помощью зарядной станции нового типа.

Методы и средства проведения исследований

Современные автономные источники питания транспортных систем представляют собой сложные технические системы. В их состав входят, помимо блоков ячеек аккумуляторных батарей, системы охлаждения, а также система управления BMS (англ. Battery Management System). Рассмотрим систему управления более подробно.

Необходимость в использовании BMS происходит из того, что ячейки, составляющие батарею, неодинаковые и отличаются между собой

по параметрам, таким как: емкость, внутреннее сопротивление, ток утечки. BMS же в свою очередь позволяет осуществлять контроль и балансировку заряда аккумуляторных ячеек батареи транспортного средства, которые могут быть соединены между собой как последовательно, так и параллельно-последовательно.

Применение систем BMS для увеличения срока службы литий-ионных батарей возможно во многих сферах производства. Так, в настоящее время литий-ионные батареи, ранее нашедшие широкое применение в электронике, используются в том числе на различных транспортных средствах с электрической тягой, таких как городской транспорт, гибридные автомобили, складские погрузчики, сельскохозяйственная и военная техника. Такие батареи используются для стартерного пуска двигателя внутреннего сгорания и обеспечения потребителя энергией при неработающем двигателе [7].

Литий-ионные источники питания, используемые на транспортных средствах, выдают рабочее напряжение в диапазоне 3,2...4,0 В, что приводит к необходимости соединять несколько источников последовательно в батарею. Рассмотрим достоинства и недостатки такой батареи. К ее достоинствам можно отнести то, что она имеет оптимальное соотношение массо-габаритных характеристик и накопленной энергии, низкий уровень саморазряда, то есть уменьшения емкости батареи и намного больший срок службы по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами (порядка 15 лет). Главный же недостаток проистекает из той самой необходимости соединять источники в батарею, поскольку возникает проблема разброса напряжений и уровней заряда отдельных аккумуляторных ячеек или «разбаланс ячеек» [8]. Он обусловлен прежде всего невозможностью создания нескольких абсолютно одинаковых источников с одинаковыми параметрами.

При использовании стандартных зарядных устройств, контролирующих общее напряжение цепочки аккумуляторов, мы можем попасть в ситуацию, когда ячейка с меньшей емкостью заряжается быстрее ячейки с большей емкостью при одинаковом токе. В этом случае при достижении этой ячейки максимального заряда, необходимо прекратить процесс зарядки или отрегулировать ток заряда до величины тока утечки. В противном случае мы получим напряжение выше оптимального, которое вы-

зовет деградацию элемента (анод металлизирован литием, а на катоде выделяется кислород). Все это приводит к увеличению температуры, снижающей срок службы батареи [9].

Есть ли возможность избавиться от этого недостатка? Есть. Способ решения данной проблемы – балансировка аккумуляторной батареи, основных методов реализации которой два: пассивный и активный [8]. Оба представлены на рис. 1. В пассивном методе энергия в наиболее заряженных аккумуляторных ячейках переводится в тепло до тех пор, пока напряжения или заряды в них не сравняются. В активном же способе заряд перекачивается из одной ячейки в другую по возможности с минимальными потерями. Современная схемотехника позволяет легко это реализовать. Рассеять проще, чем перекачать, а сравнить напряжения проще, чем сравнить заряды. При этом точно сказать, какой из способов лучше, специалисты не могут. Каждый имеет свои плюсы и минусы [9].

Метод, используемый авторами, основан на пассивном методе балансировки. Разработанная система управления батареей BMS позволяет контролировать параметры заряжаемой ячейки или аккумуляторной батареи, защищая их от работы в опасной зоне, а также считывая второстепенные данные. С данной системой идут внешняя шина данных и батарейный блок. Этот блок является «умным» аккумулятором, который должен заряжаться специальным зарядным устройством. Внутри данной батареи, состоящей из 4 ячеек, установлен микрочип, способный обмениваться информацией с зарядным устройством и выдавать пользователю статистические данные об аккумуляторе, а также идентифицировать тип аккумулятора в многофункциональном зарядном устройстве для автоматической установки правильного алгоритма заряда.

Система управления может контролировать состояние батареи, которое представлено различными параметрами, такими как:

- напряжение: полное напряжение, напряжение отдельных ячеек, минимальное и максимальное напряжение ячейки;
- температура: средняя температура ячейки, минимальная, максимальная температура эксплуатации;
- состояние заряда (SOC) – относительная величина в %, показывающая текущую емкость по отношению к максимальной емкости;

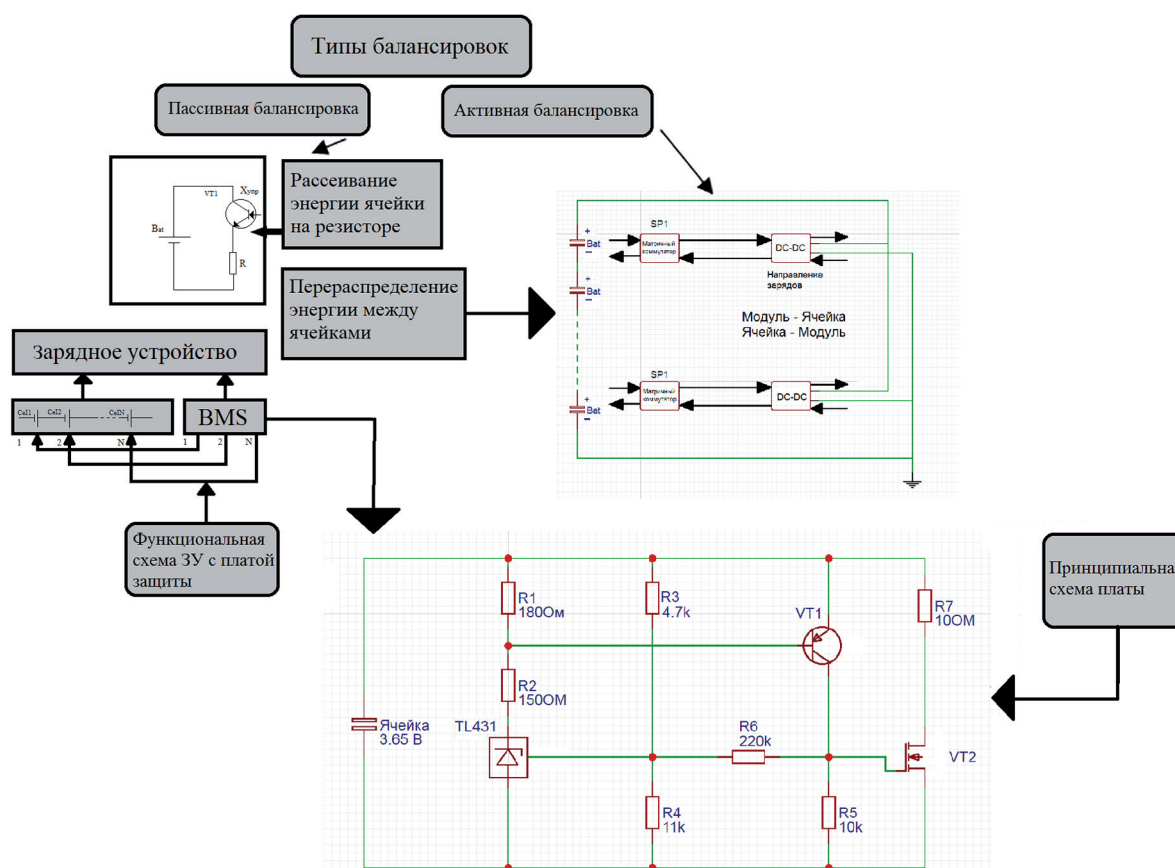


Рис. 1. Типы балансировок

– «состояние здоровья» (SOH) – комплексная величина, отображающая «состояние здоровья» аккумулятора – способность заряжаться, разряжаться, изменение характеристик при изменении условий среды и т.д.;

– ток: номинальный, максимальный зарядный и разрядный ток.

Созданная коллективом авторов система позволяет контролировать заряд и производить балансировку четырех последовательно и параллельно-последовательно соединенных ячеек батареи. Так как был выбран пассивный метод, то система сможет работать исключительно в одну сторону, то есть только поглощать заряд ячейки. При достижении порогового напряжения используемая управляющая система начинает рассеивать энергию на резисторе, превращая ее в тепло. Процесс заряда прекращается, а после достижения напряжением нижнего порога вновь возобновляется. Полностью система отключается в тот момент, когда только напряжение всех ячеек оказывается в заданном диапазоне.

Рассмотрим установку и ее элементы более подробно. Внешний вид системы, включающей в себя в том числе четыре аккумуляторные ячейки, представлен на рис. 2, а электрическая

схема – на рис. 3. Как видно, элементы размещены на макетной плате относительно компактно и их не слишком много, что является большим плюсом нашего проекта. Единственная вынесенная часть – дисплей контроля параметров.

Своего рода сердцем проекта является платформа известного производителя «Arduino» типа «Nano». На ней установлен микроконтроллер «ATmega328», выполняющий функции приема, обработки, вывода информации и управления периферийными устройствами. Платформа представлена на рис. 2, а.

Если мы говорили о том, что система контролирует параметры заряжаемой ячейки, значит для обеспечения данного процесса необходимо устройство, которое обеспечит этот контроль. Эта функция выполняется модулем аналого-цифрового преобразователя (АЦП) «ADS1115». Программные настройки 16 битного преобразователя позволяют выставить минимальный шаг в интервале от 0,2 мВ до 0,008 мВ. Таких устройств в системе три. Модуль представлен на рис. 2, б.

Еще одним параметром, который для поддержания работоспособности системы обязательно необходимо контролировать, это температура.

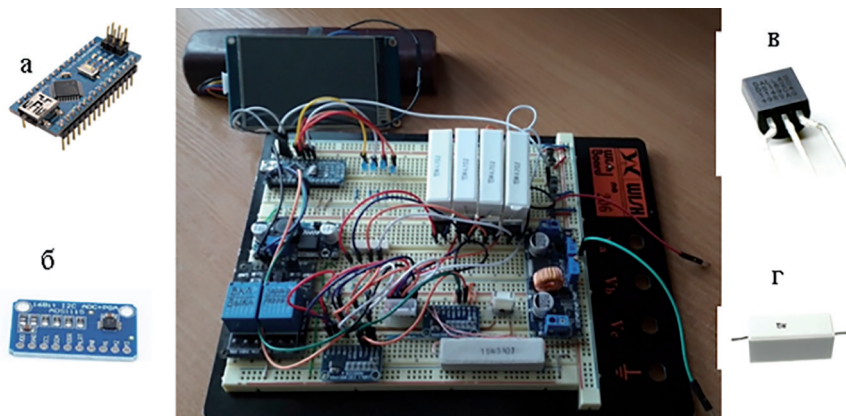


Рис. 2. Внешний вид системы управления батареями:

a – «Arduino Nano»; *б* – преобразователь «ADS1115»; *в* – датчик «DS18B20»; *г* – внешний вид цементного резистора

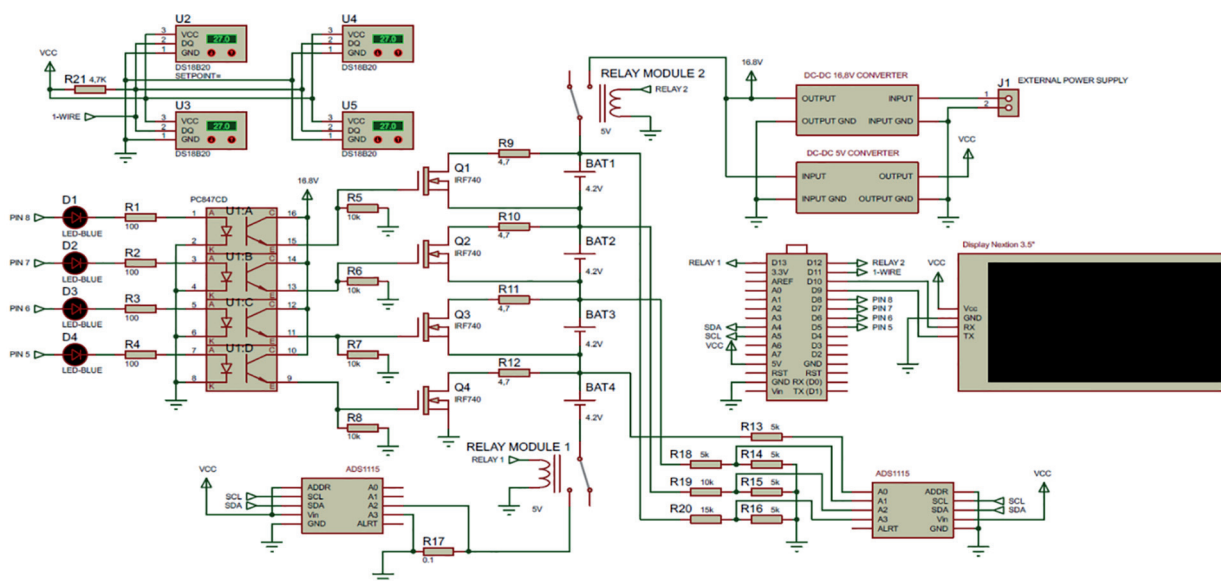


Рис. 3. Электрическая схема устройства

Данная функция возложена на электронные термометры в виде датчиков «DS18B20». Внешний вид устройства представлен на рис. 2, в. Имея небольшую погрешность в 0,5 градуса Цельсия, они охватывают диапазон от -55 до $+125$ °C. Возле каждой из четырех ячеек стоит по датчику.

Одними из самых важных элементов системы являются цементные резисторы с сопротивлением 4,7 Ом. В системе установлено четыре таких резистора, по одному на каждую ячейку батареи. Именно они рассеивает избыточную энергию в тепло, позволяя дозарядиться остальным ячейкам. Каждый резистор включается через транзисторный ключ, который управляется микроконтроллером через оптическую развязку. Внешний вид данного устройства представлен на рис. 2, г.

Рассмотрим принцип работы данной системы при зарядке литий-ионной батареи из

четырех ячеек. Допустим, что вторая ячейка зарядилась быстрее всех остальных, тогда на АЦП через делитель напряжения приходит информация об этом, и он посылает сигнал в процессор «Arduino Nano». При нормальных условиях транзистор закрыт, но при получении сигнала с процессора через оптопару на затвор в виде управляющего напряжения, он открывается и замыкает цепь резистора, начиная рассеивание энергии на нем. Остальные ячейки заряжаются без изменений, конечно, если в одной из них не произойдет подобного. Заряд ячеек аккумулятора без системы BMS представлен на рис. 4.

Проанализируем работу системы в другом случае заряда ячеек аккумулятора с применением системы BMS (рис. 5). Стартовые условия те же – вторая ячейка зарядилась быстрее, и система подключила резистор для рассеивания из-

лишков энергии, но в этот раз эта ячейка начала излишне перегреваться. В этом случае повышение температуры зафиксирует электронный термометр и после преодоления ею определенного значения, он подаст сигнал в «Arduino Nano», после чего тот с помощью реле отключит всю батарею от источника питания во избежание выхода из строя аккумулятора.

В обоих случаях информация о напряжении и температуре может быть выведена на дисплей, что представлено на рис. 6. Измеряется напряжение второй по счету ячейки. Видна

разница показаний между мультиметром и дисплеем (разница 3мВ), которую можно объяснить потерей в контактных соединениях макетной платы, погрешностью измерений мультиметра и АЦП. На практике данное расхождение показаний ни на что не влияет.

Работа установки представлена на рис. 7. В данный момент балансируется первая ячейка, о чем сигнализирует индикатор.

Аналогичным способом могут быть исследованы аккумуляторные батареи с произвольным числом ячеек.

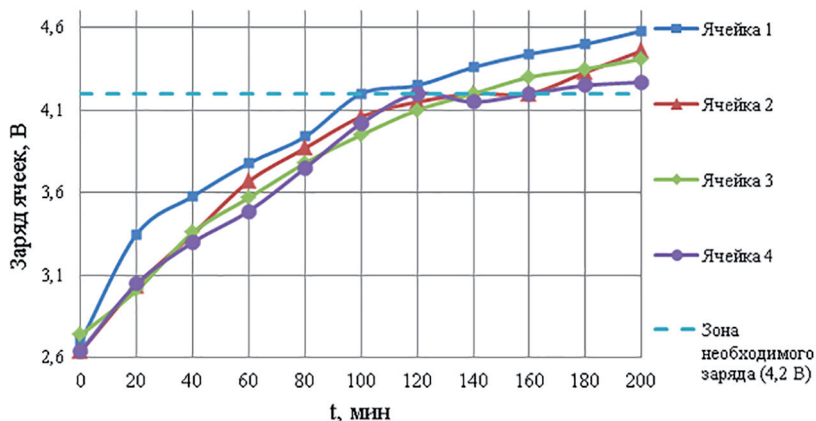


Рис. 4. Заряд ячеек аккумулятора без системы BMS

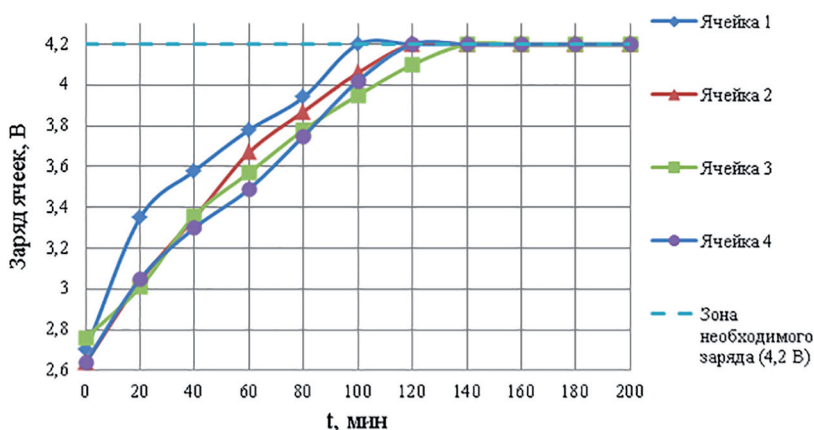


Рис. 5. Заряд ячеек аккумулятора с применением системы BMS

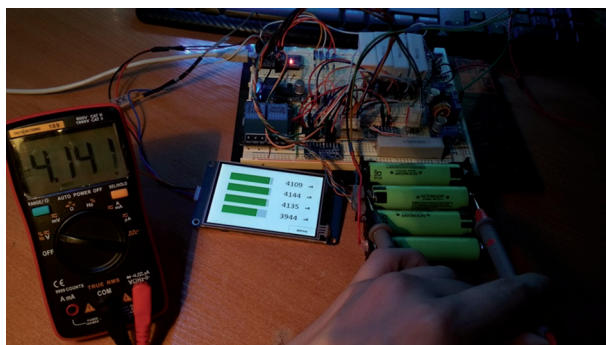


Рис. 6. Вывод показаний напряжения второй ячейки на дисплей

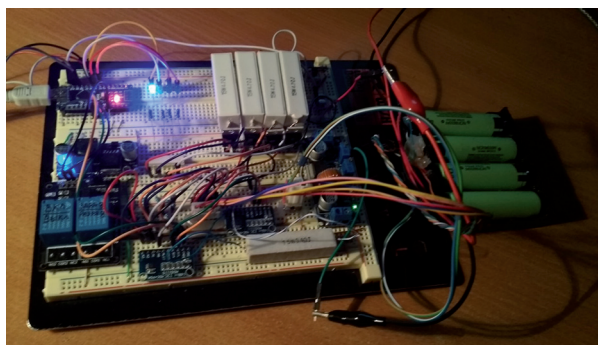


Рис. 7. Установка управления батареями в рабочем режиме

Выводы

Таким образом, результатом данной работы стала полностью работоспособная система управления батареей, выполненная по методу пассивной балансировки. Осуществлена экспериментальная проверка методики, по результатам использования которой был реализован эффективный балансировочный цикл для «умной» четырехэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи. Отличительной особенностью данной системы является ее простота, надежность и дешевизна по сравнению с аналогами. Она может использоваться для обеспечения правильной и безопасной зарядки литий-ионных батарей от мелкой электроники, до больших транспортных средств.

Рассмотрим отличительные особенности предлагаемой системы заряда:

- надежность (используются простые элементы, у которых небольшое количество возможных причин поломок и высокая вероятность безотказной работы);

- информативность и удобство (в отличие от конкурентов, данная разработка оснащена дисплеем, показывающим не степень зарядки, а непосредственно уровень напряжения, что может помочь не испортить батарею в случае отказа датчиков или найти неисправную ячейку такой батареи);

- дешевизна конструкции (цель достигнута путем использования пассивного метода балансировки);

- возможность использования системы заряда для одно- (Wire) и двухпроводных (Smbus) систем, что требует дополнительного исследования.

Коллектив авторов выражает признательность кафедре «Электрооборудование и промышленная электроника» Московского политехнического университета за помощь при проведении исследований и научную консультацию.

Литература

1. <https://www.berenberg.de/en/> (дата обращения 01.12.2018).
2. Хортов В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М. Высоковольтные системы пуска двигателей внутреннего сгорания. *Автомобильная промышленность*, 2016, № 10. С. 24–27.
3. Skvortsov A.A., Khortov V.P., Zuev S.M. High-voltage starting systems of combustion engines. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Volume 111, No 3, 2016, pp. 455–465. Index Scopus.

4. Хортов В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М., Ворожейкин В.В. Суперконденсаторные системы пуска ДВС. *Автомобильная промышленность*, 2016, № 12. С. 12–16.
5. Акимов А.В., Варламов Д.О., Зуев С.М. Конструкция, описание работы и проведение диагностики системы электростартерного пуска современных транспортных средств. Учебное пособие. М.: Московский Политех, 2017. 52 с.
6. Шматков Ю.М., Зуев С.М., Лавриков А.А. Исследование работы системы электростартерного пуска транспортных средств. Методические указания. М.: Московский Политех, 2017. 20 с.
7. Зуев С.М., Лавриков А.А., Зуева Т.М. О внутривузовской проектной деятельности в современных российских условиях. *Colloquium-journal*. 2018. № 9–4 (20). С. 19–26.
8. Зуев С.М., Шматков Ю.М., Малеев Р.А., Хортов В.П., Лавриков А.А., Варламов Д.О. Электрооборудование и электроника автомобилей в основных терминах с их объяснением на русском и английском языках. Учебный справочник. М.: Московский Политех, 2017. 196 с.
9. Иншаков А.П. Проблема мониторинга и балансировки аккумуляторных батарей транспортных средств // *Вестник Мордовского университета*. 2016. Т. 26. № 1. С. 40–49.
10. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Управление процессом заряда многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2017. № 3 (21). С. 115–123.
11. Садовников А.В., Макачук. Литий-ионные аккумуляторы // *Молодой ученый*. 2016. № 23. С. 84–89.
12. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем., М.: МЭИ., 2012. 360 с.

References

1. <https://www.berenberg.de/en/> (data obrashcheniya 01.12.2018).
2. Hortov V.P., Skvorcov A.A., Zuev S.M. High voltage starting systems for internal combustion engines. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2016, No 10, pp. 24–27 (in Russ.).
3. Skvortsov A.A., Khortov V.P., Zuev S.M. High-voltage starting systems of combustion engines. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Volume 111, No 3, 2016, pp. 455–465. Index Scopus.

4. Hortov V.P., Skvorcov A.A., Zuev S.M., Vorozhejkin V.V. Supercapacitor engine start systems. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2016, No 12, pp. 12–16 (in Russ.).
5. Akimov A.V., Varlamov D.O., Zuev S.M. *Konstrukciya, opisaniye raboty i provedeniye diagnostiki sistemy ehlektrostarternogo pushka sovremennykh transportnykh sredstv* [Design, description of work and diagnostics of the system of electric starter start-up of modern vehicles]. Uchebnoye posobie. Moscow: Moskovskij Politekh Publ., 2017. 52 p.
6. SHmatkov YU.M., Zuev S.M., Lavrikov A.A. *Issledovaniye raboty sistemy ehlektrostarternogo pushka transportnykh sredstv* [Study of the vehicle electric starter start system]. Metodicheskie ukazaniya. Moscow: Moskovskij Politekh Publ., 2017. 20 p.
7. Zuev S.M., Lavrikov A.A., Zueva T.M. Intra-university project activities in modern Russian conditions. *Colloquium-journal*. 2018. No 9–4 (20), pp. 19–26 (in Russ.).
8. Zuev S.M., SHmatkov YU.M., Maleev R.A., Hortov V.P., Lavrikov A.A., Varlamov D.O. *Ehlektrooborudovaniye i ehlektronika avtomobilej v osnovnykh terminakh s ih ob'yasneniem na russkom i anglijskom yazykah*. Uchebnyy spravochnik [Electrical equipment and car electronics in basic terms with their explanation in Russian and English. Training Reference]. Moscow: Moskovskij Politekh Publ., 2017. 196 p.
9. Inshakov A.P. The problem of monitoring and balancing vehicles batteries. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2016. Vol. 26. No 1, pp. 40–49 (in Russ.).
10. D.V. Serdechnyj, YU.B. Tomashevskij. Charge process control of multi-cell lithium-ion batteries. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'*. 2017. No 3 (21), pp. 115–123 (in Russ.).
11. Sadovnikov A.V., Makarchuk. Lithium ion batteries. *Molodoj uchenyj*. 2016. No 23, pp. 84–89 (in Russ.).
12. Burman A.P., Rozanov YU.K., SHakaryan YU.G. *Upravleniye potokami ehlektroehnergii i povysheniye ehffektivnosti ehlektroehnergeticheskikh sistem* [Managing electricity flows and improving the efficiency of electrical energy systems]. Moscow: MEHI Publ., 2012. 360 p.

STUDY OF THE BALANCING METHOD OF THE CHARGING STATION FOR LITHIUM-ION BATTERIES

PhD in Physics and Mathematics **S.M. Zuev, M.R. Aleksyuk, A.I. Kanarejkin, S.D. Habarova, S.A. Bogachev**
 Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
 KnSalex@yandex.ru

This article discusses the problem of balancing the configuration of 4S lithium-ion batteries in the charging process and the method of solving it using a new type of charging station. As a working sample, a 4-cell «smart» battery pack was used. The advantages of using the passive balancing method compared to the active one are shown.

Designed by a team of authors, the BMS battery management system layout allows you to control the physical parameters on the battery cells and to perform balancing, increasing the battery life and safety. The BMS battery management system allows you to control the parameters of a rechargeable cell or battery, protecting them from working in a hazardous area, as well as reading background data through the built-in control and analysis system based on the ATmega328 microcontroller. The control system can monitor the state of the battery, which is represented by various parameters, such as voltage, temperature, SOC charge state, «health state» SOH, current. Batteries with an arbitrary number of series and parallel-series cells of a battery can be examined.

During the research, graphical dependencies of the charge of the battery cells were obtained without using the BMS system and using this system, this allowed to analyze the technical characteristics of the battery and further develop proposals for their safe operation modes.

The use of the proposed BMS system to increase the service life of lithium-ion batteries is possible in many areas of production. Due to the large distribution of lithium-ion batteries from consumer electronics to vehicles, this development is relevant in the framework of modern electrical technology.

Keywords: lithium-ion battery, charger, passive balancing.