



УДК 621.316

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.161

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

А.С. Афанасьев¹, канд. техн. наук

М.А. Болдырев¹, ст. науч. сотр.

П.С. Воронцов¹, науч. сотр.

В.М. Суслов¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.

Ю.Т. Котов², д-р техн. наук, проф.

В.К. Вороницын², канд. техн. наук, зав. каф.

А.А. Камусин², д-р техн. наук, проф.

¹Филиал ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, ул. Комарова, д. 13, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141006; e-mail: hit-el@mail.ru

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 1-я Институтская ул., д. 1, г. Мытищи, Московская область, Россия, 141005; e-mail: kotov46@inbox.ru, voronitsyn@mgul.ac.ru

Лесозаготовительная отрасль на сегодняшний день весьма прибыльна и продукция ее востребована. Однако условия работы техники в районах лесозаготовок в России соответствуют III–V категориям эксплуатации. Актуальными являются проблемы, связанные с работой техники в холодный период года. В полной мере это относится и к системам электропитания, основу которых в ряде случаев могут составлять высокоэнергетические литиевые химические источники тока, обеспечивающие надежную работу лесозаготовительной техники и образцов специальной техники в сложных условиях эксплуатации. По сравнению с традиционными электрохимическими системами (никель-кадмиевой, никель-металлгидридной и свинцово-кислотной) литий-ионные аккумуляторные батареи обладают такими преимуществами, как высокие напряжение и плотность энергии, широкий диапазон рабочих температур, длительный срок хранения. Однако данные источники тока имеют ряд недостатков, одним из которых является их пожаро- и взрывоопасность, т. е. возможность возникновения при определенных условиях неуправляемых химических реакций, приводящих к возгоранию и взрыву. В статье показана необходимость применения в высокомоощных литий-ионных аккумуляторных батареях электронных средств защиты, рассмотрены системы контроля и управления с пассивной и активной балансировкой аккумуляторов, предложены рекомендации по их эксплуатации. Приведены результаты испытаний экспериментального образца литий-ионной стартерной аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: системы контроля и управления, высокомоощная литий-ионная аккумуляторная батарея, пожаро- и взрывобезопасность, пассивная и активная балансировка.

Для цитирования: Афанасьев А.С., Болдырев М.А., Воронцов П.С., Суслов В.М., Котов Ю.Т., Вороницын В.К., Камусин А.А. Система контроля и управления высокомоощных литий-ионных аккумуляторных батарей // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 161–170. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.161

Введение

Проблемы заготовки древесины в нашей стране становятся все более актуальными. Сегодня лесозаготовки полностью механизированы. На лесосеках можно увидеть разнообразную лесозаготовительную технику: от валочно-пакетирующих машин до харвестеров, от трелевочного трактора до форвардера. Более половины современных и большинство перспективных районов лесозаготовок в России находятся в трех климатических поясах (холодном, умеренно холодном и очень холодном), где средняя продолжительность периода с отрицательными температурами составляет 180 сут при средней температуре -15°C . Температура воздуха наиболее холодной пятидневки может достигать до $-35\dots-40^{\circ}\text{C}$, наиболее холодных суток – до $-39\dots-45^{\circ}\text{C}$ [2, 3].

Условия работы лесозаготовительной техники в районах лесозаготовок соответствуют III–V категориям эксплуатации. Кроме того, преобладают безгазное ее хранение и продолжительная работа в отрыве от производственной базы [8]. В полной мере это относится и к работе их систем электропитания в холодный период года. В ряде случаев основу систем электропитания могут составлять высокоэнергетические литиевые химические источники тока (ХИТ).

Объекты и методы исследования

ХИТ могут являться одними из основных компонентов, обеспечивающих надежную работу лесозаготовительной техники и образцов специальной техники в сложных условиях эксплуатации. По сравнению с традиционными электрохимическими системами (никель-кадмиевой, никель-металлгидридной и свинцово-кислотной) литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) обладают высокими напряжением и плотностью энергии, широким диапазоном рабочих температур, длительным сроком хранения. Именно ЛИАБ выступают объектом нашего исследования. Однако данные источники тока имеют ряд недостатков, одним из которых является их пожаро- и взрывоопасность, т. е. возникновение при определенных условиях неуправляемых химических реакций, приводящих к возгоранию и взрыву [10]. Современные высокоомощные ЛИАБ способны накапливать значительное количество энергии, высвобождение которой неконтролируемым способом (возгорание или взрыв) может привести к катастрофическим последствиям. В связи с этим при разработке высокоомощных ЛИАБ особое внимание необходимо уделять вопросам обеспечения их пожаро- и взрывобезопасности, что исключило бы возможность возникновения взрыва и возгорания в процессе хранения и эксплуатации. До настоящего времени эти вопросы изучены недостаточно. Цель данной статьи более полно осветить современные подходы к обеспечению пожаро- и взрывобезопасности высокоомощных ЛИАБ.

Результаты исследования и их обсуждение

Подход к решению данного вопроса обусловлен необходимостью широкого внедрения ЛИАБ в перспективные образцы лесозаготовительной и специальной техники, энерговооруженность которых при этом существенно возрастает. Наиболее эффективным методом обеспечения пожаро- и взрывобезопасности высокоомощных ЛИАБ является включение в их конструкцию дополнительных электронных устройств – систем контроля и управления (СКУ) [9].

СКУ представляет собой сложное функциональное устройство, предназначенное для контроля состояния батареи, ключевых эксплуатационных параметров во время заряда и разряда (напряжение, токи, внутренняя температура и температура окружающей среды батареи). Возникновение перезаряда и переразряда, короткого замыкания и чрезмерного разогрева – вот основные причины возгорания и взрыва ЛИАБ. Контролирующие цепи СКУ обеспечивают подачу сигнала на устройства защиты, которые дают сигнал тревоги либо отключают батарею от нагрузки или зарядного устройства при выходе любого из параметров за установленные пределы.

Защита от возникновения опасных режимов работы ЛИАБ осуществляется путем нивелирования разбаланса напряжений аккумуляторов, входящих в ее состав, и формирования управляющих сигналов для изменения работы внешних устройств с помощью СКУ, конструктивно размещаемой как в составе ЛИАБ, так и вне ее [1].

В СКУ, обеспечивающих выравнивание степени заряженности (балансировку) аккумуляторов, применяются методы пассивной и активной балансировки.

СКУ с пассивной балансировкой отличаются тем, что часть энергии аккумулятора с большим напряжением они рассеивают в виде тепла в окружающее пространство. При заряде путем отбора части энергии (тока) такая СКУ снижает ток заряда нивелируемого аккумулятора, уменьшая скорость заряда до тех пор, пока не зарядятся все остальные аккумуляторы. Соответствующую схему можно создать с помощью резистора необходимой мощности и управляемого ключа. Нивелирование можно осуществлять практически на протяжении всего времени заряда. Пример схемы построения пассивной балансировки приведен на рис. 1.

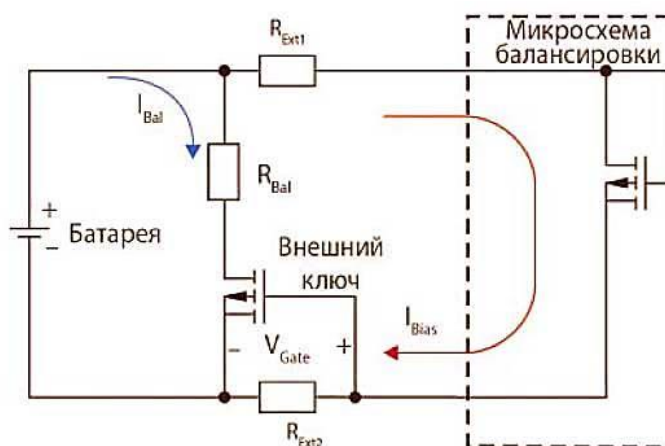


Рис. 1. Схема пассивной балансировки (I_{Bal} – ток балансировки; I_{Bias} – ток смещения; R_{Bal} – сопротивление балансировки; V_{Gate} – напряжение ключа; R_{Ext1} , R_{Ext2} – выходное сопротивление)

Fig. 1. Scheme of passive balancing (I_{Bal} – electric current of balancing, I_{Bias} – displacement current, R_{Bal} – resistance of balancing, V_{Gate} – voltage of key, R_{Ext1} , R_{Ext2} – output resistance)

При такой реализации контроллер (микросхема) осуществляет сбор информации о состоянии всех аккумуляторов батареи, сравнивая напряжения на каждом аккумуляторе с верхним и нижним порогом допустимого напряжения. По результатам сравнения с помощью внутреннего логического устройства изменяется алгоритм работы зарядного или разрядного ключевого транзистора. В режиме, когда часть аккумуляторов достигает верхнего порога напряжения, зарядный процесс выполняется одновременно с разрядом каждого из таких аккумуляторов на свое сопротивление с помощью внутренних транзисторных ключей, т. е. осуществляется выравнивание степени заряженности (балансировка) аккумуляторов. При этом ключи разряда недозаряженных элементов не включаются. Поскольку необходимо управлять и зарядом, и разрядом батареи, т. е. токами, текущими в противоположных направлениях, в схеме управления должно быть как минимум два транзисторных ключа. SKU с пассивной балансировкой в основном применяются для ЛИАБ относительно небольшой емкости при ограниченном объеме размещения [5].

В SKU с активной балансировкой передача энергии от более заряженного к менее заряженному аккумулятору осуществляется с минимальными энергетическими потерями. В [13] приводится схема построения системы активной балансировки с использованием микросхемы BQ78PL114, произведенной по технологии PowerPump, и индуктивного преобразователя для передачи энергии (рис. 2).

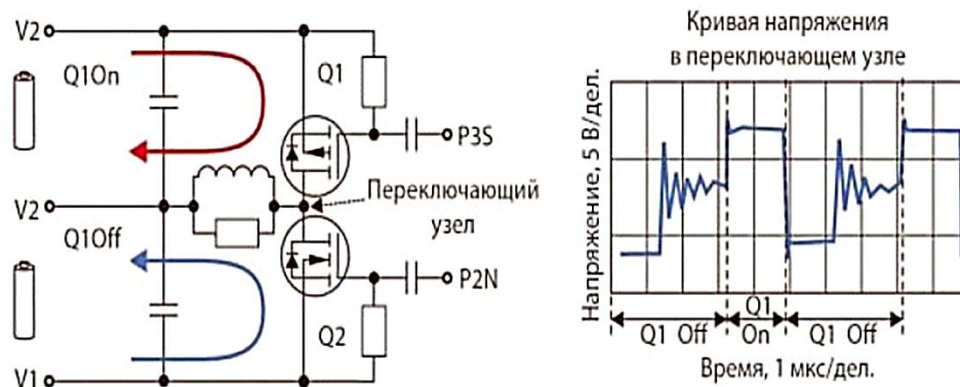


Рис. 2. Схема активной балансировки по технологии PowerPump (Q1, Q2 – ключи управления; V1, V2 – напряжения на выводах аккумулятора; P3S, P2N – управляющие выводы микросхемы)

Fig. 2. Scheme of an active balancing system designed by PowerPump technology (Q1, Q2 – control keys, V1, V2 – voltages at the battery terminals, P3S, P2N – microchip gate terminals)

Метод перераспределения заряда по технологии PowerPump при нивелировании аккумуляторов учитывает состояние заряда батареи, а не напряжение на аккумуляторе, что значительно улучшает характеристики ЛИАБ [10].

Полевые транзисторы и дроссель составляют промежуточный понижающий/повышающий преобразователь. Если микросхема определяет, что верхнему аккумулятору нужно передать энергию нижнему аккумулятору, то на выводе схемы P3S формируется сигнал частотой около 200 кГц с коэффициентом заполнения примерно 30 %. Когда ключ Q1 открыт, энергия верхнего аккумуля-

лятора запасается в дросселе, когда ключ Q1 закрыт, энергия, запасенная в дросселе, через обратный диод ключа Q2 поступает в нижний аккумулятор. Потери энергии при этом невелики и в основном приходятся на диод и дроссель. В качестве накопителей энергии могут использоваться конденсаторы [1].

Активную балансировку аккумуляторов в батареях можно также осуществлять с помощью преобразователей энергии. В этих устройствах для выравнивания заряда применяют индукторы, или преобразователи для переноса энергии с одного аккумулятора на другой.

К активному способу балансировки аккумуляторов в батарее можно отнести и следующее решение. Заряд каждого аккумулятора производится отдельно, а контроль параметров аккумуляторов (напряжение, температура и т. д.) и своевременное отключение батареи от нагрузки при достижении предельных значений параметров осуществляются за счет встроенной в батарею схемы. При этом зарядное устройство не только контролирует напряжение каждого аккумулятора, но и предохраняет все аккумуляторы от перезаряда [12].

Современная концепция проектирования электрической схемы аккумуляторной батареи сводится к тому, чтобы снабдить батарею электронным блоком, управляющим ее работой. Каждый аккумулятор батареи имеет свою микросхему, которая контролирует зарядный цикл, температуру, давление и т. д. и проектируется для каждого типа аккумулятора под заданный набор параметров.

Хотя использование микроконтроллеров в ЛИАБ увеличивает стоимость, массу и размеры оборудования, но зато многократно повышает ресурс, надежность и, главное, пожаро- и взрывобезопасность.

Высокомощные ЛИАБ имеют в своем составе большое количество аккумуляторов. В ЛИАБ каждый аккумулятор должен быть снабжен своим собственным устройством обнаружения перенапряжения. Требуются также несколько температурных датчиков, так как батарея не имеет однородной температуры по всем аккумуляторам. Последовательно соединенные аккумуляторы должны комплектоваться одним устройством контроля и защиты, если только конструкция не предполагает, что заряд каждого аккумулятора обеспечивается отдельно. В таких случаях для каждого аккумулятора предполагается собственный контроль. Подобное усложнение необходимо для высоковольтных батарей, содержащих большое количество последовательно соединенных аккумуляторов. В противном случае отдельные аккумуляторы могут стать перезаряженными и вызвать преждевременный отказ целой батареи.

Для высоковольтных батарей следует применять принцип блочно-модульного конструирования. В этом случае батареи собирают из модулей, состоящих не более чем из 8 последовательно соединенных аккумуляторов. Конструкция модуля должна обеспечивать автоматическое отключение отказавшего аккумулятора с сохранением работоспособности всего модуля. Количество модулей в составе ЛИАБ определяется требуемыми значениями выходного напряжения и емкости. Каждый модуль должен иметь собственное устройство электронного контроля.

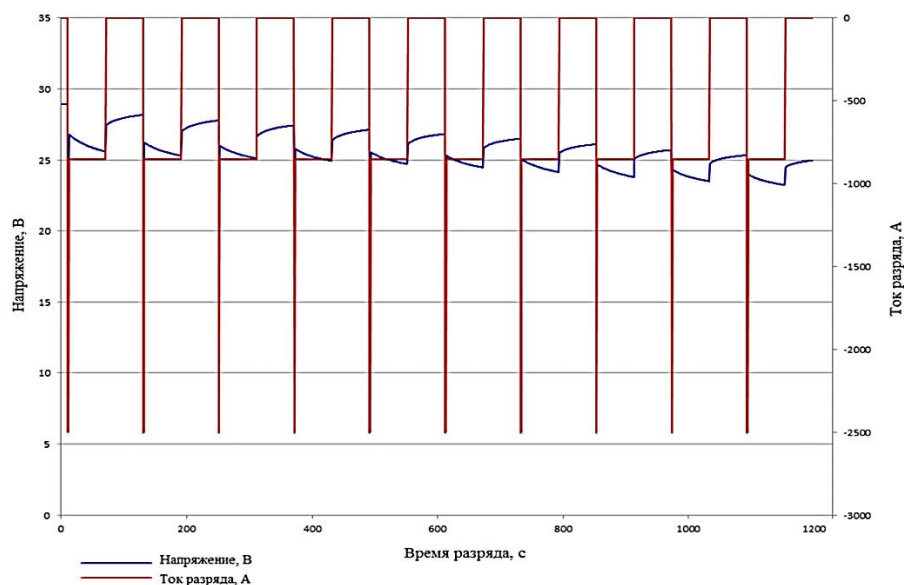
Высокомощные ЛИАБ большой емкости целесообразно комплектовать только датчиками давления и температуры, а токовыводы от каждого аккумулятора выводить на отдельный разъем. В этом случае микроконтроллером должны быть снабжены и зарядные устройства. При усовершенствовании по требованию потребителя в такие батареи могут быть дополнительно встроены микроконтроллер, термопредохранители, датчики температуры и давления для индивидуального заряда и разряда и контроля параметров каждого аккумулятора.

В 2014 г. в лаборатории Филиала ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России были проведены испытания экспериментального образца литий-ионной стартерной аккумуляторной батареи 7×10ЛИГП-К, разработанной Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе с использованием приведенных выше принципов обеспечения пожаро- и взрывобезопасности.

Цель испытаний – определение фактических эксплуатационных характеристик и возможности применения высокомоощных ЛИАБ в перспективной лесозаготовительной и специальной технике.

Технические характеристики ЛИАБ 7×10ЛИГП-К, полученные в ходе эксперимента, приведены в таблице, а вольт-амперные характеристики – на рис. 3.

Характеристика	Единица измерения	Значение
Номинальное напряжение	В	25
Номинальная емкость	А·ч	190
Напряжение полностью заряженной батареи	В	29±0,05
Конечное напряжение разряда	В	17,5±0,5
Максимальный ток стартерного режима разряда	А	850
Максимальный (пиковый) ток в стартерном режиме разряда	А	2500
Диапазон температур при эксплуатации	°С	-40...-50
Габаритные размеры	мм	235×237×515
Масса	кг	53



a

Рис. 3 (начало). Вольт-амперные характеристики ЛИАБ 7×10ЛИГП-К при разряде стартерным режимом в нормальных климатических условиях (*a*)

Fig. 3. (Continue on next page). Volt-ampere characteristics of Li-ion batteries 7×10LIGP-K at discharge in starter made under normal climatic conditions (*a*)

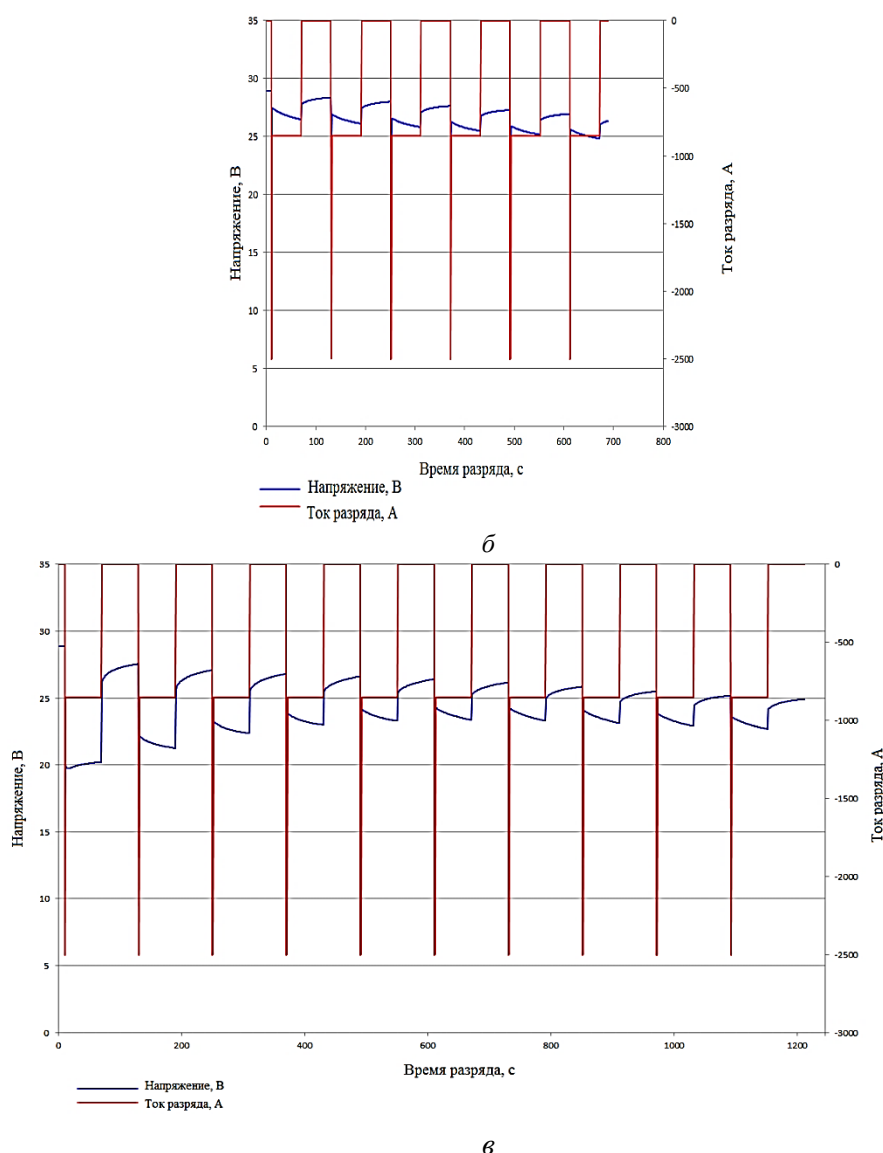


Рис. 3 (окончание). Вольт-амперные характеристики ЛИАБ 7×10ЛИГП-К при воздействии повышенной (**а**) и пониженной (**б**) температуры окружающей среды

Fig. 3. (Continued). Volt-ampere characteristics of Li-ion batteries 7×10LIGP-K at exposure to high (**a**) and low (**b**) temperatures of the environment

В результате испытаний экспериментального образца 7×10ЛИГП-К в нормальных климатических условиях и при воздействии повышенной и пониженной температуры окружающей среды была подтверждена его работоспособность при последовательных циклических разрядах стартерным режимом согласно диаграмме нагрузок перспективных объектов специальной техники [4–7, 11].

Безопасность эксплуатации 7×10ЛИГП-К обеспечивается встроенной СКУ, которая осуществляет:

балансировку аккумуляторов в ЛИАБ с точностью $\pm 0,05$ В;

измерение напряжений на аккумуляторах с точностью $\pm 0,02$ В в рабочем диапазоне изменения напряжения на аккумуляторе 1,40...4,14 В;
измерение температуры аккумуляторов с точностью ± 2 °С;
измерение тока с точностью ± 3 А;
управление процессом заряда.

СКУ содержит пассивную систему баланса, блок питания, мультиплексор напряжений блоков аккумуляторов и датчиков температуры, датчик тока, силовое зарядное реле, датчик контроля предохранителя, предохранитель на 50 А, блок усилителей согласования, процессор управления (микромикроконтроллер). Устройство с помощью системы баланса обеспечивает балансировку (выравнивание) напряжений аккумуляторов последовательно соединенных аккумуляторных блоков, сводя разность напряжений самого заряженного и самого разряженного блока в аккумуляторной батарее к минимуму.

В результате испытаний подтверждена эффективность работы СКУ, нештатных ситуаций в отношении безопасности эксплуатации испытуемого образца не зафиксировано.

Заключение

Система контроля и управления является неотъемлемой частью современных высокомоощных ЛИАБ и предназначена для обеспечения их пожаро- и взрывобезопасности. Функционал и схемы построения СКУ в ЛИАБ, как правило, реализуются индивидуально с учетом требований конкретного потребителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганзбург М.Ф., Груздев А.И., Кузовков А.В., Трофименко В.И. Принципы построения систем контроля и защиты литий-ионных аккумуляторных батарей // Физические проблемы водородной энергетики: тез. докл. V рос. конф., Санкт-Петербург, 16–18 нояб. 2009 г. СПб., 2009. С. 205–206.
2. Горбунов А.А., Бургонутдинов А.М., Бурмистрова О.Н., Тимохова О.М. К вопросу увеличения срока службы работы лесовозного автомобильного транспорта в суровых климатических условиях // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-10. С. 2092–2098.
3. Котиков В.М., Егоров Л.И., Ерхов А.В., Куликов М.И. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли (Колесные и гусеничные лесные машины). Т. 1. Двигатели внутреннего сгорания: учеб. М.: МГУЛ, 2007. 353 с.
4. Протоколы испытаний № 2-2014, 3-2014, 4-2014 испытательной лаборатории Филиала ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России. Мытищи, 2014.
5. Румянцев А.М., Рыкованов А.С., Беляев С.С. Современные литий-ионные аккумуляторы. Батареи на их основе // Компоненты и технологии. 2015. № 5. С. 96–100.
6. Рыкованов А. Системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая Электроника. 2009. № 1. С. 52–55.
7. Садовников А.В., Макаручук В.В. Литий-ионные аккумуляторы // Молодой ученый. 2016. № 23. С. 84–89.
8. Силаев Г.В. Тракторы и автомобили с основами технической механики: учеб. для вузов. М.: МГУЛ, 2009. 370 с.
9. Таганова А.А. Современный рынок герметичных аккумуляторов для портативной аппаратуры // Современная электроника. 2009. № 1. С. 10–12.
10. Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: справ. СПб.: Химиздат, 2005. 264 с.

11. Gao H.-Q., Zhang Z.-A., La Y.-Q., Li J., Liu Y.-X. // J. Cent. S. University Technol. Sci. And Technol. Mining and Met. 2008. Vol. 15, no. 6. 830 p.

12. Wen S. Cell Balancing Buys Extra Run Time and Battery Life // Analog Applications Journal. 2009. 1Q (1-й квартал). Pp. 14–18. Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf> (дата обращения: 16.01.19).

13. 電子デバイス・産業用機器 [Electronic Devices/Industrial Equipment]. Panasonic Site. Режим доступа: <http://industrial.panasonic.com/jp/> (дата обращения 17.10.18).

Поступила 17.10.18

UDC 621.316

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.161

The Control and Management System of High-Power Lithium-Ion Batteries

*A.S. Afanas'ev*¹, *Candidate of Engineering Sciences*

*M.A. Boldyrev*¹, *Senior Research Scientist*

*P.S. Vorontsov*¹, *Research Scientist*

*V.M. Suslov*¹, *Candidate of Engineering Sciences, Leading Research Scientist*

*Yu.T. Kotov*², *Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*V.K. Voronitsyn*², *Candidate of Engineering Sciences, Head of Department*

*A.A. Kamusin*², *Doctor of Engineering Sciences, Professor*

¹Branch of the 46th Central Research Institute of the Russian Defense Ministry, ul. Komarova, 13, Mytishchi, Moscow Region, 141006, Russian Federation; e-mail: hit-el@mail.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi Branch, 1-ya Institutskaya ul., 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; e-mail: kotov46@inbox.ru, voronitsyn@mgul.ac.ru

Today the logging industry is very profitable and its products are highly-demanded. However, the operating conditions of vehicles in the Russian logging areas correspond to the 3rd – 5th operation categories. Topical issues connected with the vehicle operation in the cold period. It applies to power supply systems to the full extent. High-power lithium chemical current sources, which ensure reliable operation of logging vehicles and samples of special vehicles under difficult operating conditions, can be a base for the power supply systems. In comparison with traditional electrochemical systems (nickel-cadmium, nickel-metal hydride and lead-acid), lithium-ion batteries have such advantages as high voltage, and energy density, broad range of operating temperatures, long shelf life. However, these current sources have a number of drawbacks; one of which is risk of fire and explosion, i.e. the possibility of uncontrolled chemical reactions in certain conditions leading to flame development and detonation. The article shows the importance of usage electronic means of protection in high-power lithium-ion batteries; control and management systems with passive and active balancing of batteries; offered recommendations for their use. The results of testing an experimental sample of a lithium-ion starter battery are presented.

Keywords: control and management systems, high-power lithium-ion battery, fire and explosion safety, passive and active balancing.

For citation: Afanas'ev A.S., Boldyrev M.A., Vorontsov P.S., Suslov V.M., Kotov Yu.T., Voronitsyn V.K., Kamusin A.A. The Control and Management System of High-Power Lithium-Ion Batteries. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 161–170. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.161

REFERENCES

1. Ganzburg M.F., Gruzdev A.I., Kuzovkov A.V., Trofimenko V.I. Printsipy postroyeniya sistem kontrolya i zashchity lityi-ionnykh akkumulyatornykh batarey [Design Concepts of Monitoring and Protection Systems of Lithium-Ion Batteries]. *Fizicheskiye problemy vodorodnoy energetiki: tez. dokl. V ros. konf., Sankt-Peterburg, 16–18 noyab. 2009 g.* [Physical Issues of Hydrogen Energy: Proceedings of the 5th Russian Conf., Saint Petersburg, November 16–18, 2009]. Saint Petersburg, 2009, pp. 205–206.
2. Gorbunov A.A., Burgonutdinov A.M., Burmistrova O.N., Timokhova O.M. K voprosu uvelicheniya sroka sluzhby raboty lesovoznogo avtomobil'nogo transporta v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [To the Issue of Increasing the Service Life of Logging Transport in Harsh Climate]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2015, no. 2-10, pp. 2092–2098.
3. Kotikov V.M., Egorov L.I., Erkhov A.V., Kulikov M.I. *Teoriya i konstruktsiya mashin i oborudovaniya otrasli (Kolesnyye i gusenichnyye lesnyye mashiny). T. 1. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: ucheb.* [Theory and Design of Machines and Equipment of the Industry (Wheeled and Tracked Forest Vehicles). Vol. 1. Internal Combustion Engines: Textbook]. Moscow, MGUL Publ., 2007. 353 p. (In Russ.)
4. *Protokoly ispytaniy № 2-2014, 3-2014, 4-2014 ispytatel'noy laboratorii Filiala FGBU «46 TSNII» Minoborony Rossii* [Testing Records no. 2-2014, 3-2014, 4-2014 of the Testing Laboratory of Branch of the 46th Central Scientific Research Institute, Ministry of Defense, Russia]. Mytishchi, 2014.
5. Rummyantsev A.M., Rykovanov A.S., Belyayev S.S. Sovremennyye lityi-ionnyye akkumulyatory. Batarei na ikh osnove [Modern Lithium-Ion Batteries. Batteries Based on Them]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2015, no. 5, pp. 96–100.
6. Rykovanov A. Sistemy balansa Li-ion akkumulyatornykh batarey [Balance Systems of Li-ion Batteries]. *Silovaya Elektronika* [Power Electronics], 2009, no. 1, pp. 52–55.
7. Sadovnikov A.V., Makarchuk V.V. Lityi-ionnyye akkumulyatory [Lithium-Ion Batteries]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2016, no. 23, pp. 84–89.
8. Silayev G.V. *Traktory i avtomobili s osnovami tekhnicheskoy mekhaniki: ucheb. dlya vuzov* [Tractors and Automobiles with the Basics of Engineering Mechanics: Textbook for Universities]. Moscow, MGUL Publ., 2009. 370 p. (In Russ.)
9. Taganova A.A. Sovremennyy rynek germetichnykh akkumulyatorov dlya portativnoy apparatury [Modern Market of Sealed Batteries for Portable Equipment]. *Sovremennaya elektronika*, 2009, no. 1, pp. 10–12.
10. Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S.B. *Germetichnyye khimicheskiye istochniki toka: elementy i akkumulyatory. Oborudovaniye dlya ispytaniy i ekspluatatsii: spravochnik* [Sealed Chemical Current Sources: Elements and Batteries. Equipment for Testing and Operation: Handbook]. Saint Petersburg, Khimizdat Publ., 2005. 264 p. (In Russ.)
11. Gao H.-Q., Zhang Z.-A., La Y.-Q., Li J., Liu Y.-X. *J. Cent. S. University Technol. Sci. And Technol. Mining and Met.*, 2008, vol. 15, no. 6. 830 p.
12. Wen S. Cell Balancing Buys Extra Run Time and Battery Life. *Analog Applications Journal*, 2009, 1Q, pp. 14–18. Available at: <http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf> (accessed 17.10.18).
13. 電子デバイス・産業用機器 [Electronic Devices/Industrial Equipment]. *Panasonic Site*. Available at: <http://industrial.panasonic.com/jp/> (accessed 17.10.18).

Received on October 17, 2018