

УДК 621.355

ПОДХОДЫ К СХЕМОТЕХНИЧЕСКОМУ ПОСТРОЕНИЮ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЁМКОСТЬЮ

А. И. Груздев, Е. О. Лебедев

Рассмотрены базовые подходы к созданию надёжных безопасных аккумуляторных батарей (АБ) на основе литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Разработана концепция построения для использования в космической технике АБ на основе малогабаритных индустриальных ЛИА габарита 18650. Предлагаемые подходы предусматривают реализацию организационно-технических и схемотехнических решений для защиты АБ от отказов единичных ЛИА и возникновения разбаланса напряжений. Показана возможность обеспечения автоматического парирования отказов единичных ЛИА без применения электронных блоков контроля и выравнивания напряжений за счёт использования встроенных в ЛИА одноразовых механических размыкателей силовой цепи. Проведён сравнительный анализ устойчивости к отказам ЛИА АБ в последовательно-параллельной (SP) и параллельно-последовательной (PS) электрических конфигурациях и показаны преимущества PS-конфигурации с точки зрения потерь ёмкости и роста внутреннего сопротивления при всех типах отказов ЛИА. Предложенная концепция позволяет существенно повысить радиационную стойкость и удельную энергоёмкость АБ.

Ключевые слова: космический аппарат, аккумуляторная батарея, электрическая конфигурация, разбаланс напряжений, литий-ионный аккумулятор, удельная энергоёмкость.

Аккумуляторная батарея (АБ) является одним из основных элементов системы электропитания космического аппарата (КА), во многом определяющим срок активного существования КА. В настоящее время практически завершился переход от никель-кадмиевых и никель-водородных к аккумуляторным батареям литий-ионной электрохимической схемы: все перспективные отечественные и зарубежные КА сегодня оснащаются литий-ионными АБ [1].

В общем случае литий-ионные АБ представляют собой сложное электротехническое устройство, в состав которого наряду с литий-ионными аккумуляторами (ЛИА) входят: блок контроля и управления (БКУ) с функцией выравнивания напряжений, электронные преобразователи напряжения, электротехническая аппаратура токовой защиты и др. Такой подход обеспечивает безопасность и надёжность работы, благодаря контролю состояния ЛИА в АБ, увеличивает ресурс её работы за счёт исключения опасных для неё режимов работы и парирования отказов единичных ЛИА и других элементов устройства.

В настоящей работе рассмотрены и обоснованы базовые элементы концепции построения литий-ионных АБ с повышенной удельной энергоёмкостью, радиационной стойкостью и устойчивостью к отказам единичных аккумуляторов.

При создании высокоэнергоёмких АБ требуется максимально сохранить удельные энергетические

характеристики единичных аккумуляторов при компоновке батареи на их основе. Для этого необходимо минимизировать массу остальных составных частей АБ:

- уменьшить массу конструктивных элементов, обеспечив при этом требуемую механическую прочность;

- снизить массу БКУ и электротехнических блоков, сохранив в то же время надёжность работы, все функциональные возможности, безопасность и удобство эксплуатации АБ.

Анализ технической информации [2] показывает, что ведущие производители аккумуляторных батарей для КА фирмы SAFT (Франция) и ABSL Space Products (Великобритания) успешно используют для их изготовления ЛИА относительно небольшой (до 5 А·ч) ёмкости. В связи с отсутствием в России в настоящее время и в ближайшей (3 – 5 лет) перспективе производства малогабаритных аккумуляторов в космическом исполнении нами разработана и апробирована концепция построения АБ для космической техники на базе малогабаритных индустриальных ЛИА без использования электронных блоков с электрорадиоэлементами, чувствительными к воздействию радиационных факторов открытого космического пространства. Работоспособность вне гермоотсека КА ЛИА, предназначенных для наземной эксплуатации, обеспечивается конструкцией АБ, а её отказоустойчивость –

использованием оптимальной электрической конфигурации.

Разработанная концепция построения АБ основывается на следующих подходах:

- применение промышленных ЛИА типоразмера 18650 ёмкостью более трёх А·ч, имеющих одно-разовые механические размыкатели силовой цепи CID, срабатывающие при повышении внутреннего давления;

- комплексная аттестация партии ЛИА по определенным критериям годности для макетирования, отработочных испытаний и производства партии аккумуляторных батарей в объёме, необходимом для реализации всего проекта по созданию космической техники;

- тестирование и многофакторный подбор ЛИА по параметрам (ёмкость, внутреннее сопротивление и др.) при комплектовании батареи;

- реализация схмотехнических решений, позволяющих обеспечить требуемый уровень надёжности и ресурс работы АБ в циклическом режиме, позволяющих её длительную эксплуатацию без применения электронных блоков нивелирования напряжения, байпасных устройств и сложных алгоритмов управления режимами заряда и разряда;

- использование конструкторских решений, обеспечивающих равномерное температурное поле в батарее во всех режимах её работы для выравнивания скоростей саморазряда и деградационных процессов в аккумуляторах [3].

Ввиду того, что предлагаемая концепция построения АБ предусматривает отказ от использования электронных блоков контроля и управления и, соответственно, от аппаратной защиты от отказов единичных ЛИА и возникновения разбаланса их напряжений, рассмотрим используемые нами системные подходы и схмотехнические решения построения АБ, обеспечивающие реализацию этих функций.

Различие в скорости саморазряда между ЛИА становится причиной разбаланса в степени заряженности аккумуляторов, что, в свою очередь, приводит к разбалансу напряжений в АБ. Саморазряд обусловлен как токами утечек через внешние и внутренние электрические цепи аккумуляторов, так и электрохимическими процессами, протекающими на их электродах. Следствием разбаланса напряжений является работа батареи по «худшему» (наиболее разряженному) аккумулятору, даже если он имеет наибольшую номинальную ёмкость среди всех аккумуляторов в батарее. Поэтому в нашей концепции создания аккумуляторных батарей из ЛИА малой ёмкости основополагающим

элементом становится многофакторный подбор аккумуляторов по параметрам в группы для последовательного и (или) параллельного соединения при комплектовании АБ.

На практике для построения АБ КА на основе малогабаритных ЛИА используются следующие основные электрические конфигурации:

- последовательно-параллельная схема (SP);

- параллельно-последовательная схема (PS).

К параметрам ЛИА, в наибольшей степени влияющим на деградацию характеристик в процессе эксплуатации АБ и приводящим к отказам ЛИА, следует отнести:

- номинальную ёмкость;

- внутреннее сопротивление;

- ток саморазряда.

Нами для АБ в SP- и PS-конфигурациях, состоящих из 64 ЛИА, проведены расчёты изменения их ёмкости и внутреннего сопротивления в случае отказа 8-ми ЛИА, распределённых случайным образом в АБ. Места расположения этих ЛИА в АБ были заданы с помощью генератора случайных чисел. Определение снижения ёмкости АБ при отказах 8-ми ЛИА, связанных с полной потерей их ёмкости, проведены для выборки из 1000 случайных вариантов их распределения в АБ. Для каждого варианта распределения ЛИА рассчитано значение ёмкости АБ. Затем для каждого изменяющегося с дискретностью 2,6 А·ч (ёмкость единичного ЛИА) значения ёмкости АБ подсчитано количество соответствующих этому значению вариантов распределений отказавших ЛИА. Результаты такого расчета, выраженные в относительных значениях числа распределений ЛИА и ёмкости АБ, приведены на рис. 1.

Проведённый нами расчёт и сравнительный анализ параметров АБ, построенных в разных электрических конфигурациях, показал преимущества PS-конфигурации перед SP-конфигурацией с точки зрения потерь ёмкости и роста внутреннего сопротивления при всех типах отказов ЛИА.

В разрабатываемых нами АБ автоматическая защита АБ от отказов единичных аккумуляторов построена на использовании одноразовых механических размыкателей CID, разрывающих их внутреннюю токовую цепь при повышении давления из-за перезаряда, переплюсовки или перегрева. Нами проведены исследования процесса срабатывания размыкателя CID в режиме перезаряда ЛИА малыми токами, который может иметь место при длительной работе АБ. Проведены испытания ЛИА на перезаряд от напряжения 4,05 В токами от 2 до 100 мА.

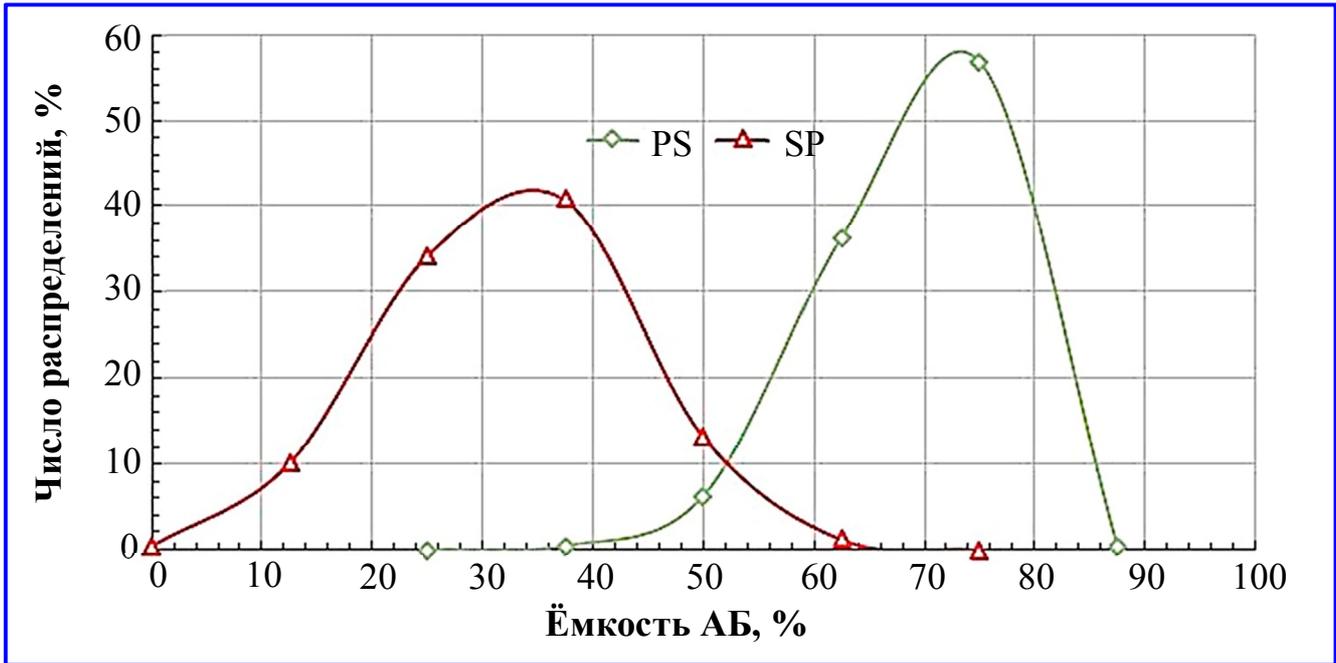


Рис. 1. Изменение ёмкости АКБ в различных конфигурациях при отказах 8-ми ЛИА [4]

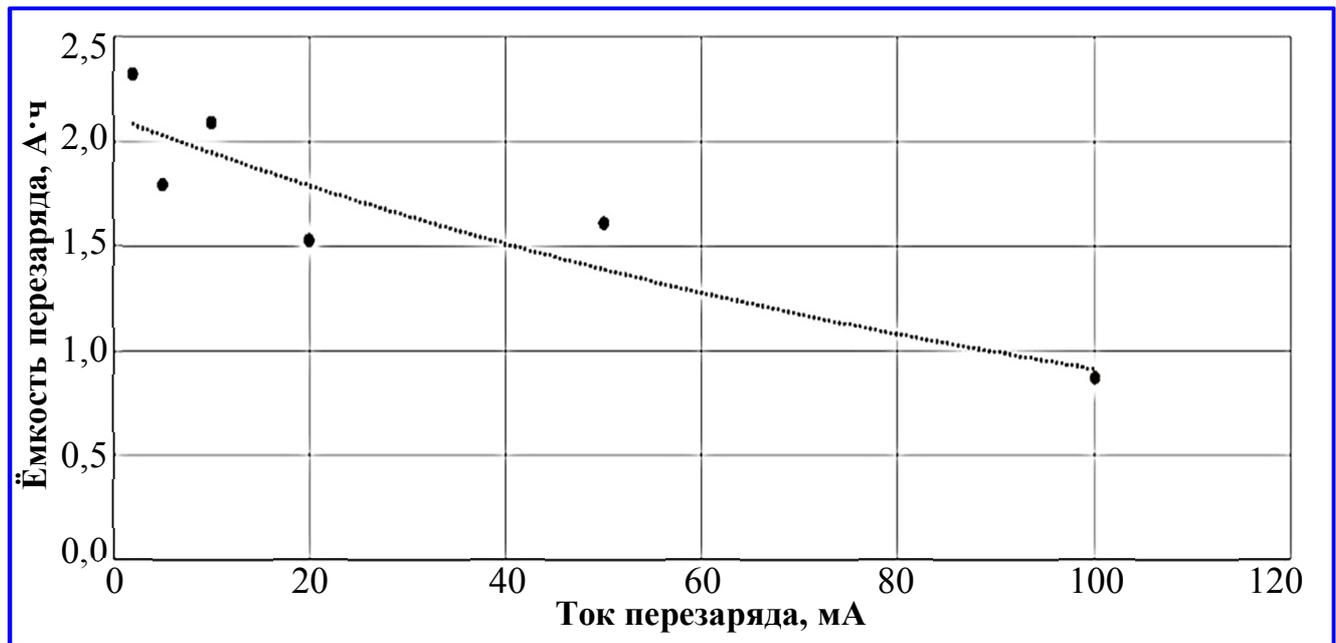


Рис. 2. Зависимость ёмкости перезаряда, необходимой для срабатывания СИД ЛИА, от величины тока перезаряда

Выявлено, что при перезаряде токами более 20 мА напряжение на аккумуляторе непрерывно увеличивается до момента срабатывания СИД. При перезаряде малыми токами (до 10 мА) перед срабатыванием СИД наблюдалось снижение напряжения ЛИА, свидетельствующее о происходящих в нём процессах, приводящих к повышению давления.

Испытания показали, что перезаряд аккумулятора неизбежно приводит к срабатыванию его СИД. При

этом необходимая для срабатывания СИД ёмкость перезаряда во всех случаях не превышает 2,4 А·ч (рис. 2).

Заключение

Предложена концепция построения АКБ с повышенной удельной энергоёмкостью, включающая тестирование и подбор ЛИА по параметрам на основе многофакторного анализа при комплектации батареи, а также исключение из её состава ап-

паратных средств защиты от отказов единичных ЛИА и возникновения разбаланса их напряжений.

Безопасная и устойчивая к отказам единичных ЛИА работа АБ обеспечивается за счёт применения схемотехнических решений, использующих встроенные в аккумуляторы одноразовые механические размыкатели CID, что позволяет автоматически парировать эти отказы без применения в составе АБ чувствительных к радиационному воздействию электронных компонентов.

Экспериментальные исследования показали, что необходимая для срабатывания размыкателя CID ёмкость перезаряда зависит от величины протекающего тока и составляет от 1 до 2,4 А·ч.

Литература

1. Хромов А. В. Литий-ионные аккумуляторные батареи низкоорбитальных космических аппаратов / А. В. Хромов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2016. – Т. 152. – № 3. – С. 20 – 28.
2. Груздев А. И., Жемчугов Г. А. Системные подходы и тенденции создания аккумуляторных батарей для космических аппаратов дистанционного зондирования Зем-

ли // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. Приложение за 2017 г. Материалы докладов Пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. – С. 207 – 211.

3. Груздев А. И., Давыдов С. В., Жемчугов Г. А., Лебедев Е. О. Исследование теплообмена в аккумуляторной батарее космического аппарата на основе промышленных аккумуляторов габарита 18650. Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. Приложение за 2017 г. Материалы докладов Пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – С. 202 – 206.

4. Груздев А. И., Давыдов С. В., Жемчугов Г. А., Лебедев Е. О. Исследование устойчивости батарей в SP- и PS-конфигурациях к деградации параметров литий-ионных аккумуляторов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. Приложение за 2017 г. Материалы докладов Пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. – С. 212 – 219.

Поступила в редакцию 15.01.2018

Александр Иванович Груздев, кандидат физико-математических наук, главный конструктор, т. (495) 365-54-38, e-mail: a_gruzdev@mail.ru.

Евгений Олегович Лебедев, инженер, т. (495) 366-20-38, e-mail: evgeny.L092@gmail.com. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

APPROACHES TO CIRCUIT DESIGN OF LI-ION STORAGE BATTERIES WITH INCREASED SPECIFIC CAPACITY

A. I. Gruzdev, E. O. Lebedev

The article deals with basic approaches to the development of reliable and safe storage batteries on the basis of Li-ion cells. The concept of building storage batteries for space applications on the basis of small industrial Li-ion cells of 18650 size has been developed. The suggested approaches envisage the implementation of organizational and technical solutions, as well as circuit design solutions for protecting storage batteries from single cell failures and voltage unbalance. The possibility to ensure the automatic single cell failure accommodation without using electronic monitoring units and to balance the voltages by means of expendable mechanical power circuit breakers built into Li-ion cells is shown. A comparative analysis of failure tolerance of Li-ion battery cells having series-parallel (SP) and parallel-series (PS) electrical configurations has been performed, and advantages of the PS configuration with respect to capacity losses and increase of internal resistance at all types of Li-ion cell failures have been demonstrated. The suggested concept allows significantly increasing the radiation resistance and specific capacity of storage batteries.

Key words: spacecraft, storage battery, electrical configuration, voltage unbalance, Li-ion cell, specific capacity.

References

1. Khromov A. V. Li-ion storage batteries for LEO spacecraft / A.V. Khromov // Matters of Electromechanics. NPP VNIIEM Proceedings. – М. : ‘VNIIEM Corporation’ JC, 2016. – V. 152. – No. 3. – Pp. 20 – 28.
2. Gruzdev A. I., Zhemchugov G. A. System approaches and trends of development of storage batteries for Earth remote sensing spacecraft // Matters of Electromechanics. NPP VNIIEM Proceedings. Appendix, 2017. Proceedings of Vth Interna-

tional Scientific and Technical Conference ‘Critical Issues in Designing of ERS Systems’. – М. : ‘VNIEM Corporation’ JC, 2017. – Pp. 207 – 211.

3. Gruzdev A. I., Davydov S. V., Zhemchugov G. A., Lebedev E. O. Investigation of heat exchange in a spacecraft storage battery developed on the basis of industrial 18650 cells. Matters of Electromechanics. NPP VNIEM Proceedings. Appendix, 2017. Proceedings of Vth International Scientific and Technical Conference ‘Critical Issues in Designing of ERS Systems’. – Pp. 202 – 206.

4. Gruzdev A. I., Davydov S. V., Zhemchugov G. A., Lebedev E. O. Investigation of resistance of SP and PS batteries to degradation of Li-ion cell parameters // Matters of Electromechanics. NPP VNIEM Proceedings. Appendix, 2017. Proceedings of Vth International Scientific and Technical Conference ‘Critical Issues in Designing of ERS Systems’. – М. : ‘VNIEM Corporation’ JC, 2017. – Pp. 212 – 219.

*Aleksandr Ivanovich Gruzdev, Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D.), Chief Designer,
tel.: +7 (495) 365-54-38, E-mail: a_gruzdev@mail.ru*
*Evgenii Olegovich Lebedev, Engineer, tel.: +7 (495) 366-20-38, e-mail: evgeny.L092@gmail.com.
(JC «VNIEM Corporation»).*