

УДК 621.355

БАЙПАСНОЕ УСТРОЙСТВО ЛИТИЙ-ИОННОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

© 2013 Н. А. Проценко

Открытое акционерное общество «Сатурн», г. Краснодар

Описана разработанная конструкция байпасного устройства, позволяющая обеспечить многократную проверку работоспособности на стадии изготовления и испытаний и обеспечивающая необходимый уровень надёжности при улучшении массогабаритных характеристик. Разработана технология изготовления силовой контактной группы, позволяющая получить минимальное переходное сопротивление контактов.

Литий-ионная аккумуляторная батарея (ЛИАБ), байпасное устройство, переходное сопротивление, надёжность.

Для обеспечения безотказной работы аккумуляторной батареи в составе системы электропитания космического аппарата (КА) необходимо предусматривать устройства, парирующие отказ любого аккумулятора путём создания обводной цепи - байпасные устройства (БУ). Эти устройства устанавливаются на каждый аккумулятор. Существуют различные типы и конструкции байпасных устройств, которые применяются в зависимости от электрохимической системы батареи.

Так, в современных никель-водородных аккумуляторных батареях (НВАБ) применяются байпасные устройства на основе диодов, которые пропускают зарядный и разрядный ток при выходе из строя любого аккумулятора (рис.1).

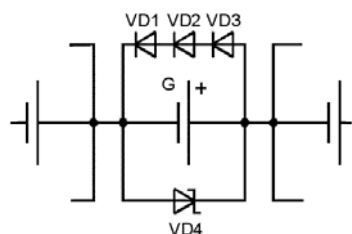


Рис. 1. Байпасное устройство никель-водородных аккумуляторных батарей

Положительным качеством такого устройства является его полностью автоматическая работа, недостатком - падение напряжения на диодах, приводящее к

уменьшению напряжения батареи и значительному тепловыделению на байпасных устройствах.

Шунтирующие устройства, применяемые для успешно работающих НВАБ, совершенно не применимы для ЛИАБ. Это связано с тем, что в байпасных устройствах на диодах зарядная ветвь открывается для прохождения тока при напряжении порядка 1,8 В. Такое напряжение превышает напряжение заряженного аккумулятора, но оказать негативное влияние на характеристики НВАБ не может по причине его устойчивости к перезарядам и переразрядам. Диод, установленный в разрядной цепи, начинает работать при переплюсовке аккумулятора, ограничивая напряжение переплюсованного аккумулятора.

Для ЛИАБ использование подобной схемы БУ невозможно, т.к. литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) работают в узком интервале напряжений: максимального 4,2 В и минимального 2,7 В. Выход напряжения на 100 мВ за пределы указанного допустимого диапазона приводит к необратимой потере работоспособности аккумулятора. Кроме того, использование в ЛИАБ байпасных диодов нецелесообразно по следующим причинам:

- трудно подобрать последовательную цепь диодов, которая обеспечит порог отключения заряда с точностью до нескольких милливольт;

- падение напряжения на диоде значительно выше, чем на контактной группе, а значит, и больше тепловыделение. Следовательно, для отвода тепла необходимо иметь радиатор, обладающий чаще всего недопустимыми для КА массогабаритными характеристиками.

Данные обстоятельства в основном и определяют реализацию силовых коммутаторов БУ на основе контактной группы, которая должна обеспечить надёжную локализацию неисправного аккумулятора в АБ [1, 3].

С учётом особенностей работы КА на орбите в ЛИАБ могут произойти следующие виды отказов аккумуляторов:

- обрыв цепи внутри аккумулятора вследствие механических воздействий во время вывода КА на орбиту. Обрыв цепи возможен и при разгерметизации аккумулятора и испарении из него электролита. Такой отказ приводит к обрыву цепи всей батареи, и при отсутствии устройства, способного создать обводную электрическую цепь в обход неисправного аккумулятора, батарея потеряет работоспособность;

- короткое замыкание (к.з.) аккумулятора (саморазряд). В случае «слабого к.з.» аккумулятор в цепи АБ будет постоянно разряжаться, его напряжение раньше других достигнет минимальных значений, и это станет причиной преждевременного

отключения разряда АБ. Батарею с таким аккумулятором необходимо всё время «выравнивать»;

- разброс значений ёмкости аккумуляторов. Если ёмкости последовательно соединённых аккумуляторов сильно различаются, то самый худший из них ограничивает минимальное напряжение разряда АБ и темп изменения напряжения такого аккумулятора от максимума до минимума будет выше, чем у исправных аккумуляторов. В случае сильного снижения ёмкости в одном из ЛИА батареи необходимо принять решение о шунтировании отказавшего модуля, создав обводную цепь вокруг аккумулятора, и исключить неисправный аккумулятор из цепи [2].

Основными требованиями, которые предъявляются к байпасному переключателю для литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата, являются надёжность, минимальные энергетические потери, минимальная масса, сохранение неразрывности цепи АБ при переключении, механическая и радиационная стойкость.

На рис. 2 представлена электрическая схема подключения байпасного переключателя и временная диаграмма работы переключателя для обеспечения сохранения неразрывности цепи аккумулятора при переключении.

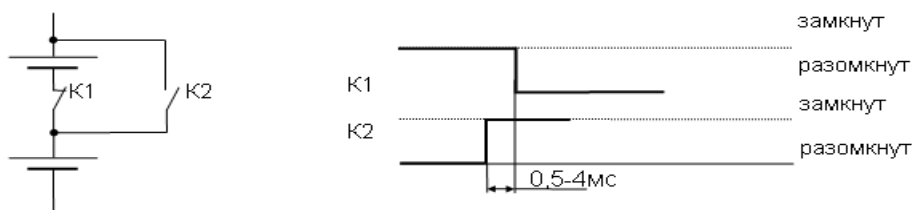


Рис. 2. Схема подключения и временная диаграмма работы байпасного переключателя

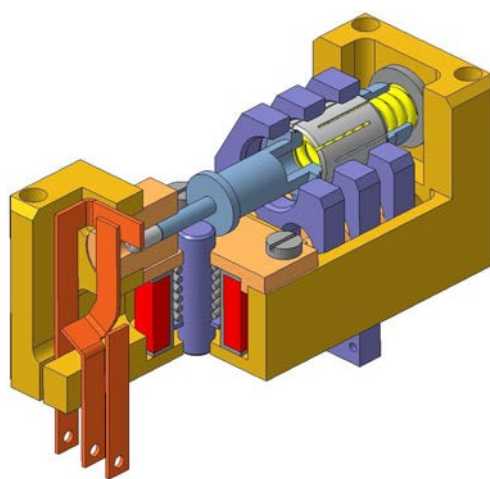
Учитывая, что приведённые выше три случая отказа охватывают все возможные причины выхода из строя литий-ионной батареи, можно сделать вывод, что АБ будет функционировать, если в её состав включить БУ с использованием контактов. Следует отметить, что АБ все-

гда проектируются с учётом возможной потери одного аккумулятора. Но даже в этом случае АБ может обеспечивать номинальные потребности в энергии до конца срока активного существования КА.

В зависимости от энерговооружённости КА оснащаются литий-ионными

аккумуляторами различной ёмкости. Очевидно, что с увеличением энерговооружённости космического аппарата возрастает значение ёмкости аккумуляторной батареи и становится исключительно актуальной своевременная локализация неисправного аккумулятора. В настоящее время промышленностью производятся и частично эксплуатируются в космических аппаратах ряд БУ, отличающихся принципом действия, конструкцией и характеристиками.

Существенным недостатком известных конструкций является невозможность проведения пробных срабатываний, и поэтому надёжность устройств оценивается только на основе статистических данных.



а

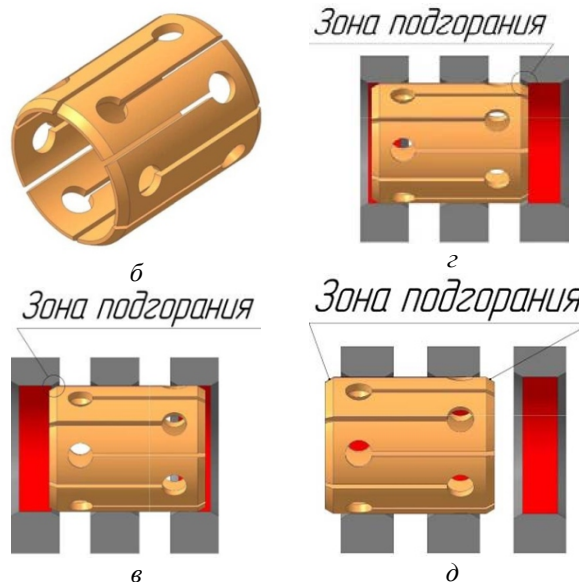


Рис. 3. Конструкция байпасного устройства (а), подвижного контакта (б) и положение зон подгорания контактов во время срабатывания БУ (в - д)

При активировании байпасного переключателя на электронагревательный элемент подаётся ток, выделяемое тепло расплавляет легкоплавкий сплав и освобождает пружину фиксатора. Под действием пружины фиксатор перемещается вниз и освобождает путь движению исполнительного механизма с подвижным контактом под действием рабочей пружины. Подвижный контакт вначале замыкает нормально разомкнутые контакты, а затем размыкает нормально замкнутые контак-

ты. Это обеспечивает неразрывность общей цепи соединения аккумуляторов в батарее в процессе переключения, а промежуток времени от момента замыкания нормально разомкнутых контактов до размыкания нормально замкнутых контактов определяется длиной подвижного контакта и скоростью перемещения.

Отличительной особенностью данного устройства от устройств, выполняющих подобные функции, является дублированность контактов за счёт использо-

вания в качестве подвижного контакта втулки в виде цанги, которая имеет множество точек контакта к неподвижным контактам. Достоинством данного устройства является возможность проведения пробных срабатываний переключателя в период проведения испытаний при изготовлении. К достоинствам контактной группы со скользящим подвижным контактом можно отнести отсутствие влияния на их работу подгорания контактов во время коммутации токов к.з. Контактная группа спроектирована таким образом, что зона подгорания контактов после полного перемещения цанги остаётся за границами рабочей поверхности как подвижного, так и неподвижных контактов (рис. 3, в – 3, з).

При разработке проводились аналитические и экспериментальные исследования поведения узлов байпасного устройства под воздействием эксплуатационных факторов во время его штатной работы.

Одним из таких исследований является моделирование процесса перемеще-

ния исполнительного механизма с подвижным контактом во время срабатывания БУ под действием штатных токов нагрузки и вызванных процессом переключения токов короткого замыкания отключаемого аккумулятора. Целью исследования являлось математическое подтверждение невозможности ситуации, когда возникшие электродинамические усилия (ЭДУ) между подвижным и неподвижными контактами смогли бы остановить работу БУ в промежуточном положении и оставить отключаемый аккумулятор в короткозамкнутом состоянии. Такая ситуация, несмотря на сравнительно небольшую остаточную ёмкость неисправного аккумулятора, может привести к значительным тепловыделениям, прогреву соседних в АБ аккумуляторов и даже к его разрушению.

Моделирование заключалось в определении времени перемещения подвижного контакта БУ и его изменении во всём диапазоне как штатных токов нагрузки, так и токов к.з.

$$T = \sqrt{\frac{S \cdot \pi \cdot l}{(F - k \cdot z) - \left(\left(\tau_0 \times \frac{1 - \mu^2}{E} \times \alpha_T \right)^{\frac{1}{2}} + \beta \right) \times \left(P_{\text{РАЗЖ}} + 2 \times 10^{-7} \times I^2 \left[\ln \frac{S \times B}{\Gamma \times \left[1 + \sqrt{\left(\frac{S}{\Gamma} \right)^2 + 1} \right]} + 0,25 \right] \right)} } \quad (1)$$

Учитывалось влияние ЭДУ; изменение сил трения в силовой контактной группе; масса деталей, совершающих перемещение под действием силовой пружины. Результаты моделирования представлены на графиках (рис. 4).

Как видно из графика, представленного на рис. 4, з, штатный ток в 50 А не оказывает влияния на движение подвижного контакта, т.к. вызванные электродинамические усилия значительно меньше усилий пружины, перемещающей исполнительный механизм. Ток к.з. несколько замедляет подвижный контакт, но это

снижение скорости не приводит к его полной остановке.

При изготовлении первых опытных партий БУ был зафиксирован разброс значений переходного сопротивления силовой контактной группы, что говорило о нестабильности технологии их изготовления. Кроме того, этот параметр является вторым качественным показателем (после возможности проверки работоспособности), который призван повысить конкурентоспособность нового байпасного устройства в сравнении с БУ фирмы NEA.

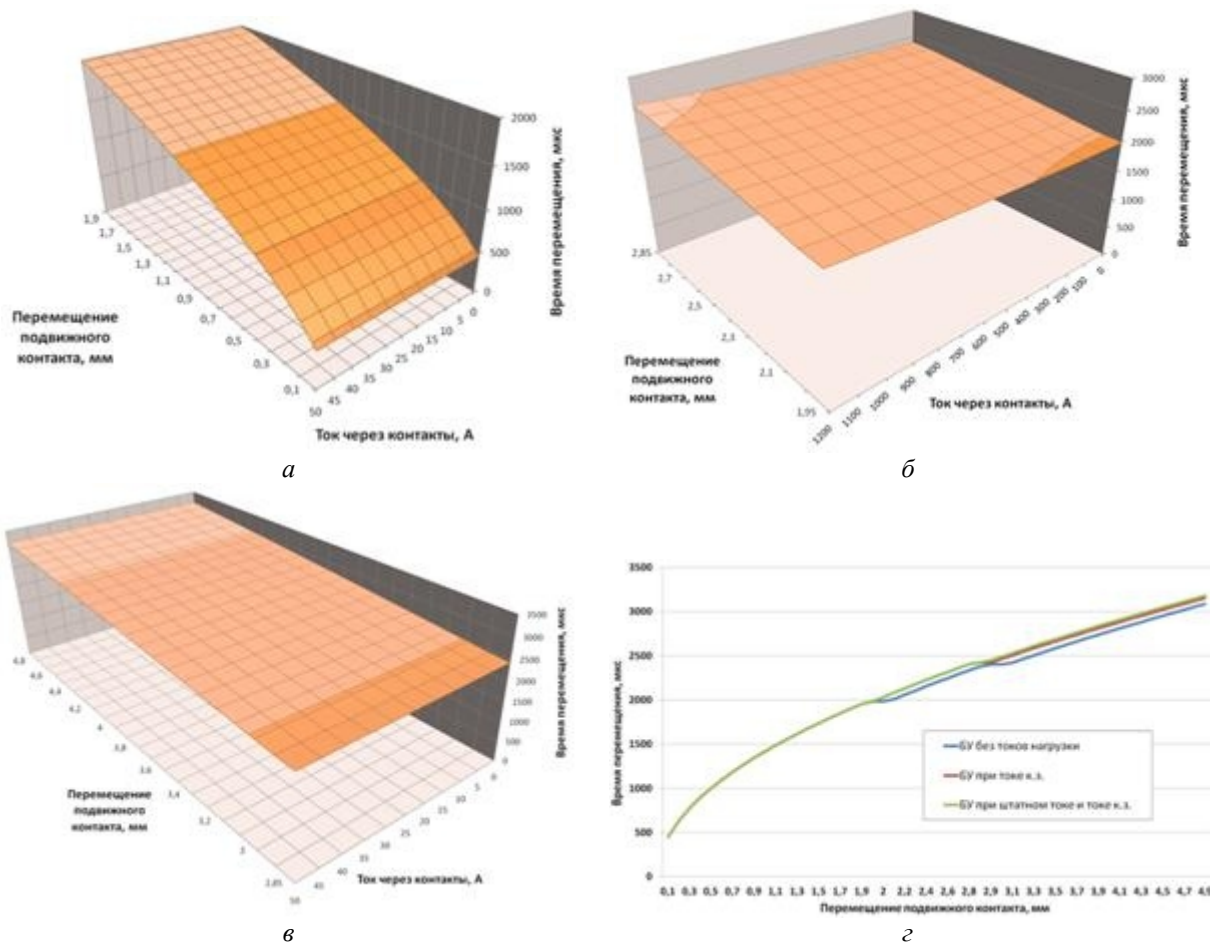
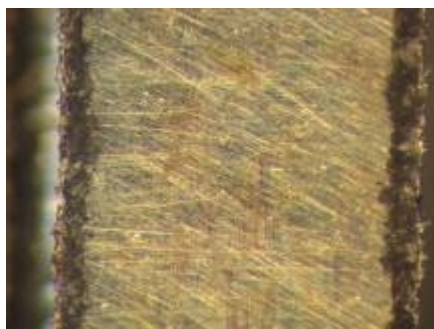


Рис. 4. График движения подвижного контакта: а – на участке до начала к.з., б – на участке с токами к.з., в – на участке после окончания действия к.з., г - при разных токах, проходящих через силовую контактную группу

В результате исследований поверхностей контактов и их размеров были сформулированы требования, направленные на снижение величины переходного сопротивления контактов БУ: повышение точности изготовления и качества рабочих поверхностей силовых контактов БУ; совместная обработка неподвижных контактов и комплектования ими БУ; обеспе-

чение точности позиционирования неподвижных контактов в корпусе БУ; введение операций притирки и приработки подвижного и неподвижных контактов.

На примере подвижного контакта на рис. 5 показано изменение качества поверхности до и после отработки технологии.



а



б

Рис. 5. Качество рабочей поверхности подвижного контакта до (а) и после (б) отработки технологии

Принятый комплекс мер позволил добиться стабильного переходного сопротивления на уровне 100-130 мкОм, что значительно превосходит устройства, рассчитанные на аналогичные токи производства фирмы NEA.

Стендовые испытания подтвердили стойкость байпасного устройства ко всем видам воздействия эксплуатационных факторов. БУ подвергалось термоциклированию. При этом имитировались хранение аккумуляторной батареи и её штатная работа на борту. Работа на борту КА имитировалась с одновременным пропусканием токов заряда и разряда АБ. Аккумуляторная батарея и БУ во время транспортировки и вывода на орбиту подвергаются вибрационным и ударным нагрузкам, способным привести к их разрушению.

Испытания на устойчивость к механическим воздействиям являются неотъемлемой частью квалификационных испытаний. Имитация всех воздействий одновременно не представляется возмож-

ной, поэтому БУ подвергаются нагрузкам по каждому виду воздействия по очереди в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях. Это позволяет оценить механическую устойчивость БУ с максимальным приближением к реальным воздействиям.

Механические испытания наряду с тепловыми подтвердили устойчивость БУ к воздействию эксплуатационных факторов. Критерием оценки являлось сохранение байпасным устройством работоспособности, отсутствие разрушения конструкции, отсутствие самопроизвольного срабатывания и сохранение исходных характеристик.

В ходе электрических испытаний была подтверждена способность силовой контактной группы байпасного устройства коммутировать значительные токи короткого замыкания во время отключения неисправного аккумулятора. На рис. 6 представлены осциллограммы работы контактной группы нескольких БУ, на которых проводились испытания.

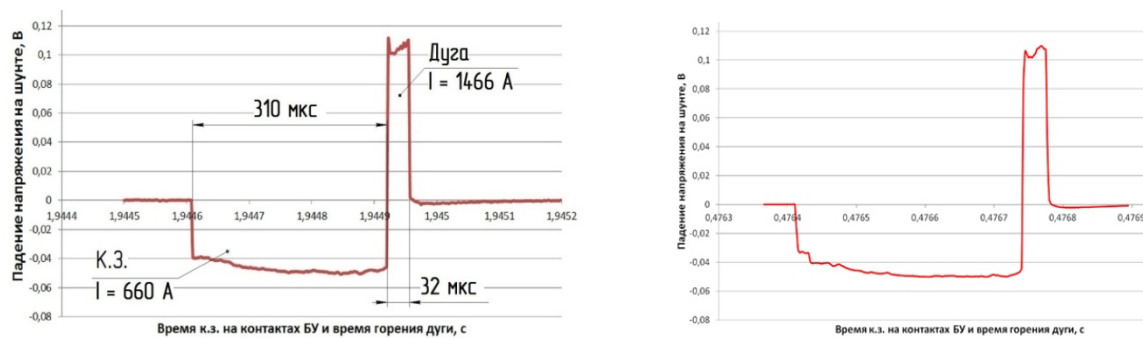


Рис.6. График изменения напряжения на шунте во время пропускания по нему токов к.з. в двух аналогичных экспериментах на разных образцах БУ



Рис.7. График изменения напряжения на силовых контактах БУ во время пропускания по ним токов к.з.

Как видно из графиков (рис. 6), работа контактов всегда происходит стабильно, без дребезга и резких изменений переходного сопротивления. Возникновение дуги связано с перенапряжениями, возникающими вследствие высокой индуктивности системы «аккумулятор – БУ». Значения этих перенапряжений отчётливо видны при измерении напряжения на нормальнозамкнутых и нормально разомкнутых контактах (рис. 7).

Во время эксперимента производилась видеосъемка, на которой отчётливо видно вспышку в момент замыкания и размыкания аккумулятора.

Несмотря на то что подобные вспышки сопровождаются потемнением места возникновения искры, влияния на параметры, в частности на переходное сопротивление БУ, они оказать не могут. Как отмечалось ранее, контактная группа БУ спроектирована таким образом, что зона подгорания окажется за местом возникновения искры.

В ходе математического расчёта, основанного на результатах испытаний и справочных данных, вероятность безотказной работы предложенного байпасного устройства составила 0,999.

Основные технические характеристики разработанного байпасного переключателя не уступают характеристикам аналогичного переключателя, разработанного фирмой NEA для комплектации аккумуляторных батарей на основе нового литий-ионного аккумулятора VES-180, а

по удельным массогабаритным характеристикам превосходят его.

Разработана необходимая документация для выпуска промышленных серий байпасных устройств ЛИАБ космического назначения на предприятии ОАО «Сатурн» (г. Краснодар). Результаты исследования внедрены применительно к АБ космического аппарата «Глонасс-К2».

Библиографический список

1. Проценко, Н.А. Пути обеспечения безопасности и ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей космического назначения [Текст] / Ж.М. Бледнова, В.В. Галкин, Н.А. Махутов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2010. – № 1. – С. 43-54.
2. Проценко, Н.А. Расчетно-экспериментальная оценка распределения температур в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора (ЛИА) космического назначения [Текст] / В.Ю. Лапшин, Ж.М. Бледнова // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2010. – Т.12. – № 4(3). – С. 596-600.
3. Проценко, Н.А. Байпасное устройство с использованием материалов с эффектом памяти формы для обеспечения работоспособности ЛИАБ космического назначения [Текст] / Ж.М. Бледнова, В.В. Галкин // Полет. – 2011. – №6. – С. 58-60.

BYPASS DEVICE OF A LITHIUM-ION STORAGE BATTERY

© 2013 N. A. Protsenko

“Saturn” Joint Stock Company

The article describes the developed bypass device design that allowed providing multiple check of operability at the stage of manufacturing and testing, ensuring the required level of reliability with improvement of weight-size characteristics. A technology of fabricating a power contact unit is developed that makes it possible to obtain a minimal contact resistance.

Lithium-ion storage battery (lib), bypass device, contact resistance, reliability.

Информация об авторе

Проценко Николай Александрович, начальник сектора, ОАО «Сатурн», г. Краснодар. E-mail: procenko@geo.kuban.ru. Область научных интересов: системы энергоснабжения космических аппаратов, электромеханика.

Protsenko Nikolai Alexandrovich, chief of section, “Saturn” plc. E-mail: procenko@geo.kuban.ru. Area of research: power supply systems for spacecraft, electromechanics.