

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ КОНТРОЛЯ И ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М.Ф. Ганзбург, А.И. Груздев,
В.И. Трофименко
(ОАО «АВЭКС»)

Рассмотрены системные подходы и схемотехнические решения, реализованные ОАО «АВЭКС» при создании аппаратуры контроля и защиты высоковольтных литий-ионных аккумуляторных батарей. Проведён сравнительный анализ вариантов аппаратного нивелирования напряжений и байпасных устройств в аккумуляторной батарее. Экспериментально показана возможность использования разработанных трансформаторных блоков нивелирования напряжений для сохранения работоспособности батареи при потере ёмкости или отказе одного или нескольких аккумуляторов.

Ключевые слова: высоковольтная аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, аппаратура контроля и защиты, устройство нивелирования, байпасное устройство.

Для современных космических аппаратов (КА) требуется повышение их энерговооружённости в связи с увеличением потребления их полезной нагрузки до значений 15 – 20 кВт и выше. В связи с чем необходимо переходить к высоковольтным системам электроснабжения (СЭС) с рабочими напряжениями более 100 В (в настоящее время стандартным рабочим напряжением СЭС считается 27 – 28,5 В [1]).

Целесообразность увеличения напряжения в сети СЭС выше принятого ранее номинала стала очевидной ещё в 1974 – 1975 гг. при проектировании СЭС КА «Алмаз», рассчитанной на нагрузку с электрической мощностью до 10 кВт. Однако отсутствие в то время соответствующей элементной базы не позволило это реализовать. В последнее время промышленность России освоила выпуск элементной базы для создания электронной аппаратуры регулирования и контроля (АРК), а также устройств защиты и коммутации. Например в ряде организаций уже имеется опыт создания как контактных, так и бесконтактных аппаратов защиты и коммутации для КА на напряжения до 300 В постоянного тока.

Так же, как и в авиации, переход на КА с напряжения 28 В на напряжение 100 В и более позволяет существенно (на десятки процентов) улучшить массоэнергетические параметры СЭС и аппаратуры полезной нагрузки. Учитывая, что дальнейшее повышение напряжения уже не даёт столь заметного положительного эффекта, а проблемы, связанные, например, с явлениями пробоя или с токами

утечки, усложняются, для таких СЭС повышенное рабочее напряжение бортовой сети выше 120 – 150 В нецелесообразно.

Учитывая, что в настоящее время, как правило, напряжение аккумуляторных батарей (АБ) меньше или равно напряжению СЭС, то максимальное (зарядное) напряжение параметрического ряда высоковольтных АБ целесообразно ограничить на уровне 120 В, а для его реализации использовать унифицированные модули с напряжением порядка 30 В. Модульный принцип построения АБ позволяет сократить временные и материальные затраты на их построение, одновременно повышая надёжность их работы за счёт использования хорошо отработанных и ранее апробированных схемотехнических и конструкторских решений.

Благодаря более высоким удельным энергетическим и мощностным параметрам, наиболее перспективным типом аккумуляторов являются литий-ионные аккумуляторы (ЛИА), использовать которые в АБ СЭС КА начала компания Saft в 2004 г. [2]. Первая в России литий-ионная АБ, изготовленная ОАО «Сатурн», была установлена на борту КА «Глонасс-М» № 27, запущенном в декабре 2008 г. [3].

До настоящего времени в АБ для КА используются ЛИА с оксидными катодами, имеющие номинальное напряжением 3,6 В. Однако уже началась апробация для космических применений ЛИА с катодом на базе литированного фосфата железа, которые хотя и имеют более низкие удельные энергетические параметры из-за несколько меньшего (3,2 В) номинального на-

пряжения, но обладают в 2 – 3 раза большим ресурсом работы и безопасны в эксплуатации. Сегодня этот тип ЛИА активно вытесняет ЛИА с оксидными катодами. В связи с этим для построения высоковольтных АБ целесообразно использовать аккумуляторные модули (АМ), состоящие из восьми ЛИА, учитывая, что:

- при использовании ЛИА с катодом из литированного фосфата железа такой модуль будет иметь стандартное напряжение 28,5 В;

- предпочтительнее иметь более высокое номинальное напряжение модуля, так как:

- алгоритм работы АБ предусматривает вывод из силовой цепи отказавшего (обрыв, короткое замыкание или большая потеря ёмкости) ЛИА;

- снижение максимального зарядного напряжения ЛИА увеличивает ресурс их работы [4].

Определяющее значение для обеспечения надёжной безаварийной работы литий-ионных АБ, улучшения их технических и эксплуатационных характеристик имеет аппаратура контроля и защиты (АКЗ).

Основные задачи АКЗ:

- защита АБ от перезаряда, переразряда и перегрева путём формирования предупреждающих и аварийных сигналов в бортовой вычислительный комплекс (БВК) для изменения режима работы АБ;

- повышение разрядной ёмкости АБ прежде всего за счёт балансировки в ней напряжений (выравнивание степени заряженности) отдельных ЛИА;

- парирование отказов одного или нескольких ЛИА, связанных с потерей им ёмкости, с коротким замыканием или с обрывом в силовой цепи;

- подготовка и передача в БВК телеметрической информации о состоянии АБ.

Основной функцией АКЗ является обеспечение в реальном масштабе времени контроля состояния отдельных ЛИА и формирование информационных и управляющих сигналов для обеспечения их работы в безопасных диапазонах напряжений и температур [5]. Увеличение в высоковольтной АБ количества последовательно соединённых ЛИА приводит к увеличению числа каналов контроля и управления, а это в свою очередь требует пересмотра подходов к проектированию АКЗ.

Прежде всего изменения связаны с переходом от моноблочной АКЗ, имеющей количество каналов контроля и управления соответствующее

общему количеству ЛИА, к многоуровневой модульной системе управления с чётким разделением функций модулей разного уровня. При этом модули АКЗ нижнего уровня управления целесообразно непосредственно интегрировать с АМ. Модульность построения АКЗ позволяет унифицировать изделия, разрабатываемые не только для АБ с разным номинальным напряжением, но и построенных на разных типах аккумуляторов, отличающихся рабочими диапазонами напряжений.

Наибольшими преимуществами для построения высоковольтной АБ обладает АКЗ, интегрированная с батареей не только на уровне аккумуляторных блоков, но и на уровне единичных аккумуляторов (рис. 1).

АКЗ включает:

- модули выравнивания и коммутации (МВК1 – МВК32), устанавливаемые непосредственно на борнах каждого ЛИА;

- модули контроля и управления (МКУ1 – МКУ8), устанавливаемые на боковой поверхности каждого АМ, которые служат для электронных модулей дополнительной радиационной защитой;

- модуль измерения тока (МИТ);

- контроллер мультиплексного канала, обеспечивающий обмен информацией модулей МКУ и МИТ с блоком управления верхнего уровня;

- блок управления верхнего уровня, его функции может выполнять БВК КА.

Питание модулей АКЗ осуществляется от обеспечивающего заряд и разряд АБ блока АРК СЭС, формирующего напряжение 28 В частотой 20 кГц.

МВК (рис. 2) [6] состоит из:

- резервированного байпасного ключевого элемента для закорачивания ЛИА, рассчитанного на рабочие токи АБ;

- резервированного ключевого элемента для подключения к ЛИА резистора, обеспечивающего его доразряд при выравнивании напряжений;

- аналогового датчика температуры, измеряющего температуру одного из борнов аккумулятора.

Электропитание МВК осуществляется из МКУ.

МКУ, используя МВК, обеспечивает для восьми ЛИА:

- измерение напряжения;

- измерение температуры;

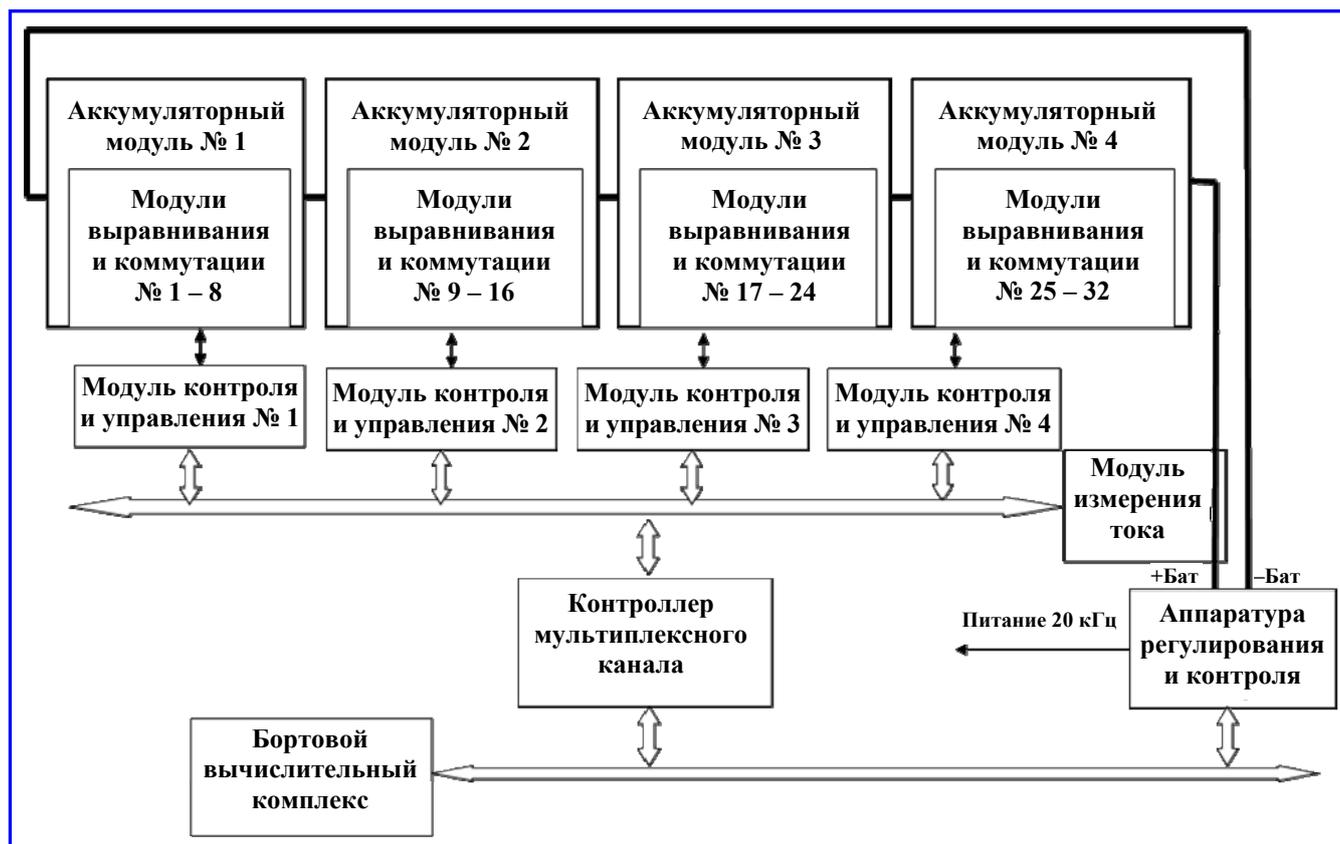


Рис. 1. Структурная схема высоковольтной АБ (без резервирования)

– включение/отключение выравнивающего резистора;

– включение байпасной цепи.

Измерение напряжений и температуры осуществляется с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), к которому последовательно через коммутационный блок аналогового мультиплексора подключаются измерительные цепи напряжения и температуры от МВК, установленные на входящих в АМ ЛИА. Информация с АЦП поступает в микроконтроллер по синхронному последовательному интерфейсу, где подвергается первичной статистической обработке и формируется в пакет для передачи в блок управления верхнего уровня для дальнейшей обработки и анализа. Формирование управляющих сигналов для включения выравнивающих резисторов и байпасных цепей осуществляется МВК по командам, поступающим по мультиплексному каналу от блока управления верхнего уровня (от БВК).

МИТ состоит из измерительного токового трансформатора, АЦП и микроконтроллера, обеспечивающего статистическую обработку полученных данных и их передачу в БВК.

Резервирование МКУ и МИТ осуществляется их дублированием в АКЗ.

Связь вышеперечисленных модулей АКЗ нижнего уровня управления с БВК осуществляется с помощью контроллера мультиплексного канала (КМК), включающего:

- микроконтроллер;
- оперативное запоминающее устройство;
- оконечное устройство;
- устройство сопряжения;
- устройство управления.

Обмен цифровой и управляющей информацией в АКЗ осуществляется по мультиплексному каналу



Рис. 2. Модуль выравнивания и коммутации



Рис. 3. Блок контроля и управления батареями из семи ЛИА с током подзаряда до 10 А

в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003 по основным и резервным каналам обмена. Код передачи информации «Манчестер-2».

Достоинствами предлагаемого построения АКЗ является:

- удобство установки и надёжность подключения датчиков напряжения и температуры к ЛИА;
- минимизация длины кабелей передачи аналоговых сигналов, а также технологичность подключение МКУ к АМ;
- идентичность и полная взаимозаменяемость МКУ, отличающихся только идентификационными номерами и задаваемыми переключками на платах;
- эффективный отвод тепла от выравнивающих резисторов и байпасных цепей МВК через борны аккумуляторов;
- относительно высокое быстродействие контроля параметров АБ за счёт модульности построения АКЗ;

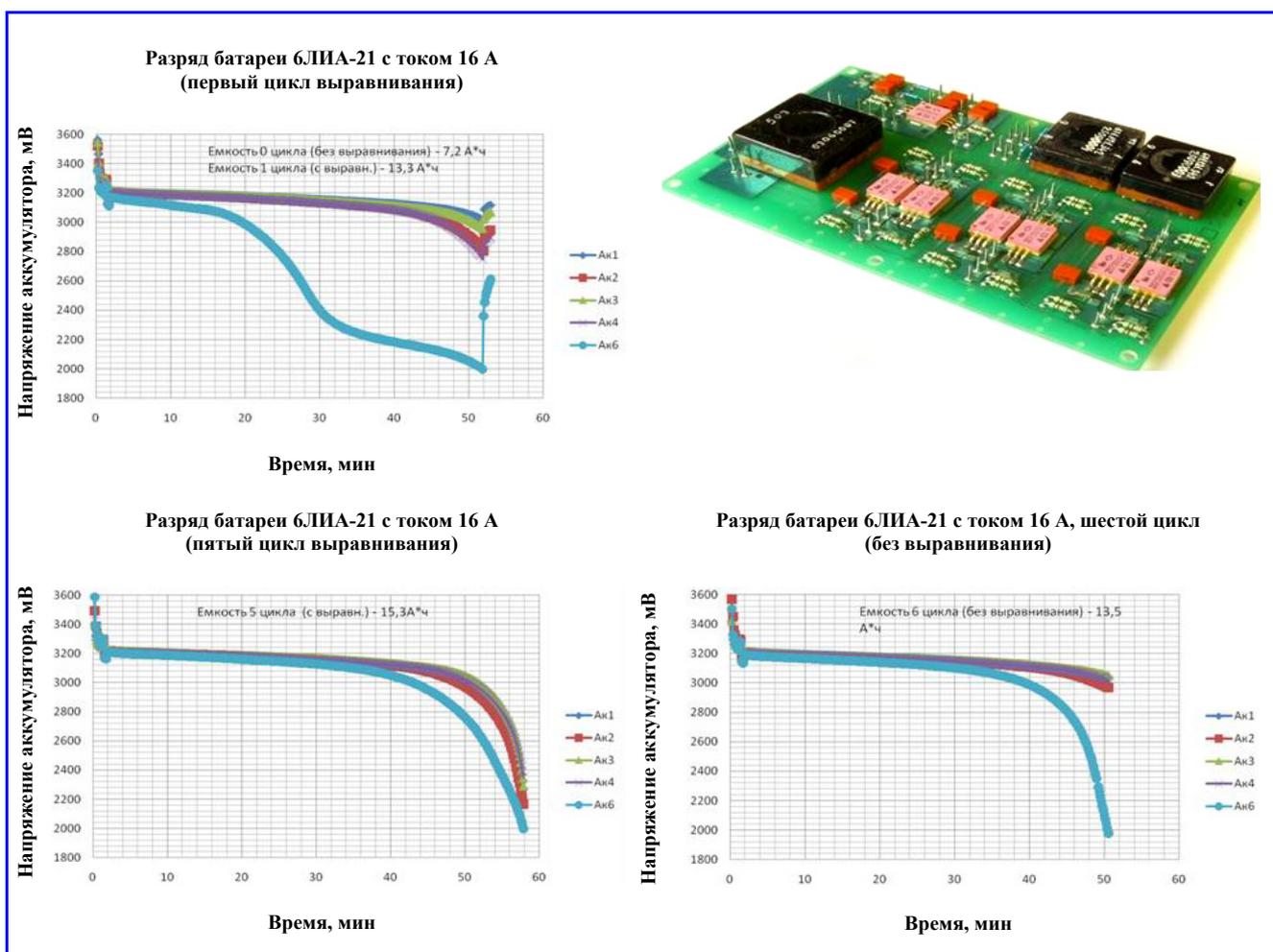


Рис. 4. Внешний вид и графики, иллюстрирующие работу трансформаторного блока выравнивания напряжений

– простота перепрограммирования АКЗ на работу с любым типом аккумуляторов, а не только с литий-ионными;

– возможность реализации различных способов нивелирования напряжения в АБ и различных типов байпасных устройств.

ОАО «АВЭКС» реализованы несколько технических решений модулей выравнивания напряжений [7]:

1. Устройства с шунтированием наиболее заряженных ЛИА (см. рис. 2).

2. Устройства с подзарядом наименее заряженных элементов.

3. Устройства с перераспределением энергии внутри батареи между отдельными аккумуляторами с использованием трансформаторных схем.

Устройства с шунтированием наиболее заряженных элементов, имея преимущества в простоте и надёжности, характеризуются более высоким тепловыделением и позволяют скомпенсировать только различие в саморазряде ЛИА в батарее.

Устройства с подзарядом аккумуляторов отличаются от других более сложной конструкцией, но при этом позволяют производить выравнивание напряжений ЛИА не только при заряде, но и при разряде, перераспределяя энергию в АБ для частичной компенсации потери ёмкости одним или несколькими аккумуляторами (рис. 3).

Устройства с перераспределением энергии внутри батареи между отдельными аккумуляторами, использующие трансформаторные схемы, благодаря относительной простоте схемотехнических решений [8], являются достаточно надёжными и также позволяют скомпенсировать не только разницу в саморазряде, но и частично потерю ёмкости ЛИА в батарее (рис. 4) [9].

Трансформаторный блок нивелирования напряжений выполнен на отечественной элементной базе и позволяет при разбалансе напряжений в 1 В обеспечить перетекающие токи между ЛИА в АБ до 15 А. При испытаниях на батарее с железо-фосфатными ЛИА уже на первом цикле выравнивания он позволил увеличить разрядную ёмкость разбалансированной АБ с 7,2 до 13,3 А·ч. В последующих (2 – 5) циклах, несмотря на частичную потерю ЛИА № 6 своей ёмкости, он позволил разрядить АБ на 15,3 А·ч, обеспечивая при этом одновременный полный разряд всех ЛИА. При выключении блока нивелирования разрядная ёмкость АБ сразу же

снизилась до 13,5 А·ч из-за ограничений разряда ЛИА № 6.

Заключение

Для КА с мощной полезной нагрузкой напряжение бортовой сети СЭС необходимо увеличить до 120 В и более.

Высоковольтные АБ для СЭС КА целесообразно строить по модульному принципу на базе ЛИА.

Использование модульного принципа при создании АКЗ высоковольтных АБ позволяет унифицировать их конструкцию и базовые схемотехнические решения, повысить помехозащищённость, быстродействие и надёжность работы.

Использование выравнивающих устройств, реализующих трансформаторные схемы перераспределения энергии или использующих подзаряд «отстающих» ЛИА от одного или нескольких источников постоянного тока, позволяет не только нивелировать разбаланс напряжений в АБ, но и обеспечивать её полный разряд, а не работать по графику худшего ЛИА.

Литература

1. Анализ технических требований к системам электропитания автоматических космических аппаратов / А. В. Чечин, В. И. Пушкин, А. С. Гуртов [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. Трудов НПП «Полус». – Томск : МГП «Раско», 2001. – С. 59 – 66.
2. Progress of ongoing NASA Lithium-Ion cell Verification testing for aerospace applications / В. I. VcKissock and el. // NASA/TM–2008-215154. – 2008.
3. Литий-ионные аккумуляторы космического назначения (проблемы, основные направления работ и полученные результаты) / В. В. Галкин, С. Д. Лихоносов, В. П. Кулыга [и др.] // Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах : материалы XI Междунар. конф. ; под ред. М. С. Плешакова. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С. 278 – 281.
4. Кедринский И. А. Li-ионные аккумуляторы / И. А. Кедринский, В. Г. Яковлев. – Красноярск : Платина, 2002. – 266 с.
5. Груздев А. И. Концепция построения систем контроля и управления высокоэнергоемких литиевых аккумуляторных батарей / А. И. Груздев // Электрохимическая энергетика. – 2005. – Т. 5. – № 2. – С. 90 – 93.
6. Системные подходы к построению литий-ионных аккумуляторных батарей / А. И. Груздев, В. И. Трофименко // Физические проблемы водородной энергетики : тезисы докладов VI российской конференции. – СПб., 2010. – С. 161 – 162.

7. Принципы построения систем контроля и защиты литий-ионных аккумуляторных батарей / М. Ф. Ганзбург, А. И. Груздев, А. В. Кузовков [и др.] // Физические проблемы водородной энергетики : тезисы докладов V российской конференции. – СПб., 2009. – С. 205 – 206.
8. Пат. РФ на полезную модель, МПК Н 02 G 7 / 00. Устройство выравнивания напряжения в батарее / А. И. Груздев, А. В. Кузовков, Б. М. Пашков, С. И. Яблочкин ; патентообладатель ОАО «Авиационная электроника и коммуникационные системы». – № 37 884; заявл. 24.12.2003 ; опубл. 10.05.2004.
9. Проблемы построения систем контроля и управления литий-ионных аккумуляторных батарей / М. Ф. Ганзбург, А. И. Груздев, В. И. Трофименко // Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах : материалы XI Междунар. конф. ; под ред. М. С. Плешакова. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С. 289 – 293.

Поступила в редакцию 02.06.2011

*Михаил Феликсович Ганзбург, канд. техн. наук, первый заместитель генерального директора,
т. (499) 257-05-09, e-mail: avelkott@mail.ru.*

*Александр Иванович Груздев, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник,
т. (499) 257-67-11, e-mail: a_gruzdev@mail.ru.*

*Владимир Иванович Трофименко, канд. техн. наук, начальник отдела,
т. (499) 257-67-11, e-mail: ogk3@mail.ru.*