

### Выводы

Благодаря разработанной структуре автоматизированной подсистемы синтеза и анализа конструкций РЭС на базе специализированной программы АСОНИКА-ТМ, стало возможным повышение эффективности процесса проектирования конструкций РЭС, отвечающих требованиям нормативных документов по механическим характеристикам, сокращение сроков и стоимости их создания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры. - М., 1983. - 256 с.

2. Остроменский П.И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. - 173 с.

3. Доминич А. П. Планирование испытаний РЭА на вибростойкость// Радиоэлектроника (состояние и тенденции развития). -1993.-№2.-С. 16-30.

4. Кофанов Ю. Н. и др. Информационная технология моделирования механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств – М.: Радио и связь, 2000. - 160 с: ил.

5. Шалумов А.С. Моделирование механических процессов в конструкциях РЭС на основе МКР и аналитических методов: Учебное пособие. - Ковров: Ковровская государственная технологическая академия, 2001.-296с.

6. Гришин А. Н. Анализ конструкций радиоэлектронных средств на основе конечно-элементных моделей. – Орел: ФГБОУ ВПО, 2007. – С. 56-59.

УДК 629.78

## ЗАЩИТА И КОНТРОЛЬ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.В. Долженко, к.т.н. О.Н.Замирец, В.А.Лебедь, Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г. Харьков

*В статье рассмотрено применение литий-ионных аккумуляторных батарей в системе энергообеспечения космического аппарата, а так же системы их защиты и контроля.*

*У статті розглянуто застосування літій-іонних акумуляторних батарей у системі енергозабезпечення космічного апарату, а також системи їх захисту та контролю.*

*In article considers the use of Li-ion batteries) in the energy supply system of the spacecraft and their protection and control .*

**Ключевые слова:** энергообеспечение, литий-ионная батарея, заряд, разряд.

### Актуальность

Современная космическая технология является одним из немногих направлений, которые определяют стратегическое место государства в мире. Изучение и освоение космоса требуют развития и усовершенствования космических аппаратов (КА) различного назначения. При этом наибольшее практическое значение имеют автоматические беспилотные КА для формирования систем связи, телевидения, навигации и геодезии, наблюдения и передачи информации, изучения погодных условий и природных ресурсов Земли, исследования дальнего космоса и т.д. Создание КА для решения этих задач требует энергетического обеспечения достаточно точно заданных функций - как целевых, так и вспомогательных: по точности ориентации, коррекции параметров орбиты, обеспечения теплового режима.

К энергетическим установкам для космических исследований относится требование высокой удельной

энергии, так как стоимость запуска в космос резко возрастает с увеличением массы.

Энергоустановки для космоса должны быть надежными, устойчивыми к воздействиям радиации, ударов, вибрации, иметь большой срок службы, не вызывать шума и вредных выбросов, работать в условиях невесомости. Бортовая аппаратура многих космических систем питается от солнечных батарей в комплекте с аккумуляторами. На первом этапе использовались серебряно-цинковые аккумуляторы, однако из-за малого ресурса их, в значительной мере, вытеснили более тяжелые, но более долговечные серебряно-кадмиевые и никель-кадмиевые аккумуляторы, которые нашли применение на Международной космической станции «Салют», аппаратах «Марс», «Венера», спутниках «Метеор», «Молния», «Надежда», «Космос» и др.. Позже на космических аппаратах и спутниках нашли применение никель-водородные аккумуляторы, имеющие более высокие значения удельной энергии и ресурс. В последние годы в космической технике используются никель-металлогидридные аккумуляторы, характеризующиеся более высокими значениями удельной энергии и мощности. Однако их ресурс существенно меньше ресурса никель-водородных аккумуляторов. В настоящее время все более широкое применение находят литий-ионные аккумуляторные батареи.

### Энергообеспечение космического аппарата

Обеспечение электрической энергией бортового оборудования автоматических КА - комплексная задача, которая включает генерацию, накопление, стабилизацию и распределение электроэнергии.

Для нормального функционирования системы необходимо обеспечить согласованный режим работы

источников и потребителей электроэнергии, а также обеспечить в оборудовании нагрузки необходимое напряжение с минимальными пульсациями. Функцию согласования источников и потребителей выполняют дискретные регуляторы или полупроводниковые преобразовательные устройства.

Выход из строя системы энергообеспечения (СЭО) ведет к отказу всего аппарата.

Проблема создания высокоэффективных, надежных СЭО КА имеет первостепенное значение, ее решение может значительно улучшить технико-экономические показатели КА в целом, а комплекс направлений ее решения невозможно воплотить в жизнь в целом без соответствующих организационно-методических, научных и технологических мероприятий.

Разработка литий - ионных аккумуляторов (ЛИА) в герметичном корпусе и аккумуляторных батарей (АБ) на их основе является одним из приоритетных направлений в космической энергетике. Это обусловлено тем, что удельные энергетические характеристики (массовые и объемные) таких аккумуляторов существенно выше, чем у других типов аккумуляторов при аналогичном сроке службы и количества циклов заряд-разряд. ЛИА надежно работают при их параллельном соединении в группы, что позволяет создавать литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) различной емкости, используя ЛИА одного типоразмера.

#### **Система контроля и защиты ЛИАБ**

Для обеспечения длительного срока службы (ресурса) АБ очень важно проводить непрерывный мониторинг текущего технического состояния аккумуляторов АБ, своевременно проводить различные профилактические меры по восстановлению

Реализация системе контроля и защиты (СКЗ) необходимых функций может быть обеспечена или с использованием элементной базы общего назначения, или с применением специализированных микросхем (Battery Management IC). У каждого варианта есть свои плюсы и минусы.

Для реализации необходимых функций система, в общем случае, должна содержать следующие узлы - датчики температуры, узлы измерения тока и напряжения, АЦП, устройство обработки информации от датчиков, устройство расчета емкости ЛИАБ, устройство управления силовыми ключами, которые отключают блок аккумуляторов от полюсов ЛИАБ и внешних цепей заряда - разряда, интерфейс для связи с внешними устройствами, а также устройства индикации текущей емкости ЛИАБ.

В частном случае, при необходимости реализации меньшего количества функций, состав и структура СКЗ может быть значительно проще.

В специализированных микросхемах необходимые узлы могут быть интегрированы в одном или нескольких корпусах, например, микроконтроллер ATmega406 фирмы Atmel или пара bq29312, bq20z80 фирмы Texas Instruments - микросхемы, предназначенные для СКЗ батареи из 2-4 последовательно соединенных аккумуляторов.

СКЗ на микросхемах bq29312, bq20z80 обеспечивает защиту аккумуляторов от перезаряда, переразряда, перегрузки по току и короткого замыкания во внешних цепях (путем отключения аккумулятора от одного из полюсов ЛИАБ), выполняет выравнивание зарядов последовательно соединенных аккумуляторов, делает расчет текущей емкости ЛИАБ с учетом саморазряда при хранении.

Число последовательно соединенных аккумуляторов в ЛИАБ, необходимые установки защиты, их параметры, алгоритм функционирования СКЗ определяются разработчиком СКЗ и ЛИАБ, задаются через интерфейс SMBus на этапе изготовления СКЗ или составления ЛИАБ и могут быть изменены в процессе эксплуатации батареи. Через SMBus возможно считывание параметров ЛИАБ: текущей емкости и напряжения аккумуляторов, текущих и пиковых токов заряда и разряда, других параметров.

Функционально аналогичные микросхемы также у ряда других производителей микросхем - Maxim - Dallas Semiconductor, Linear Technology, Microchip Technology, Mitsumi, Xicor. Однако Texas Instruments предлагает, пожалуй, самый большой выбор микросхем для разработчиков СКЗ как одно-элементных, так и много-элементных ЛИАБ.

Для повышения надежности функционирования Texas Instruments предлагает формировать в СКЗ два независимых канала контроля напряжения аккумуляторов. С этой целью может быть сформирован, так называемый, вторичный уровень защиты на специализированной микросхеме bq2940x в дополнение к основному уровню на bq29312. Микросхема вторичного уровня защиты (secondary protection IC) формирует сигнал для пережигания одноразового предохранителя, отключает блок аккумуляторов от одного из выводов ЛИАБ в случае несрабатывания (неисправности) схемы защиты первого уровня (bq29312, силовые ключи).

Функционально менее сложные СКЗ могут быть реализованы, например, на UCC 3952-x (Texas Instruments) или на MC33349 (On-Semiconductor). Это примеры специализированных микросхем, обеспечивающих контроль минимума необходимых параметров аккумулятора одноэлементной ЛИАБ. При построении СКЗ на микросхемах такого типа следует иметь в виду, что силовые ключи, которые выключают аккумулятор от цепей заряда и разряда, могут или входить в состав микросхемы - (UCC 3952 - x), или быть внешними (MC33349). Использование внешних ключей предоставляет разработчику возможность применения СКЗ в ЛИАБ с более высокими токами заряда - разряда, а также дает возможность использования этих ключей для организации цепей защиты аккумуляторов по другим параметрам, например, по температуре.

Применение специализированных микросхем на основе типовых схем включения является оптимальным решением для создания СКЗ ряда аккумуляторных батарей относительно небольшой емкости (вследствие определенной организации таких микросхем, например, длина ячейки памяти bq20z80 для записи текущей емкости в миллиампер - часах равна двум байтам), для высокоемкостных ЛИАБ с высокими токами заряда -

разряда необходимо использование элементной базы общего назначения.

Функциональные узлы в этом случае могут представлять собой отдельные конструктивно разнесенные блоки, объединенные центральной схемой управления. Здесь необходимо учитывать следующие моменты.

Энергопотребление элементной базы должно быть сведено к минимуму. В случае длительного хранения ЛИАБ желательнее иметь возможность перевода микросхем СКЗ в «спящий» режим. Для увеличения времени хранения ЛИАБ без подзаряда ток СКЗ в целом должен быть ниже тока саморазряда ЛИАБ. Вариант, удобный для практического применения, - MSP430xxxxx (x) от Texas Instruments (очень низкий ток потребления, достаточное количество портов ввода -вывода, большой объем памяти, встроенный ЦАП, АЦП, компараторы, интерфейсные модули, драйвер ЖКИ).

Для высокочастотных ЛИАБ с большими токами заряда - разряда для измерения протекающего тока оптимальным может быть применение индуктивного датчика тока, а не шунта, обычно используемого в ЛИАБ невысокой мощности. Для точного расчета емкости в случае необходимости работы ЛИАБ в широком диапазоне токов заряда - разряда может потребоваться использование нескольких датчиков - для больших и малых токов.

Применение общей элементной базы может быть вызвано еще и тем, что в ряде случаев при построении СКЗ батарей специального назначения специализированные микросхемы, функционально пригодные к использованию, не предназначены для работы в необходимом диапазоне температур.

При разработке СКЗ на специализированных микросхемах, так же как и при разработке СКЗ на элементной базе общего назначения, в некоторых случаях необходимо решать общие проблемы, одной из которых является тепловыделение. Возможные пути решения - применение в качестве ключей транзисторов с минимальным сопротивлением канала в открытом состоянии, токоизмерительных шунтов оптимального сопротивления (уменьшение сопротивления шунта увеличивает погрешность измерения тока), или использование индуктивных датчиков тока, оптимизация расположения нагретых элементов в корпусе ЛИАБ.

Элементы СКЗ условно можно разделить на три группы:

1) Встроенные в аккумулятор элементы СКЗ. Ток короткого замыкания литиевого аккумулятора может достигать значения 20-30 Сн (где Сн - номинальная емкость аккумулятора). При коротком замыкании небольшого аккумулятора типоразмера 18650 (несколько больше аккумуляторы типоразмера АА) емкостью 1800 мА·ч значение тока составит 50-60 А.

Для защиты от последствий протекания таких токов аккумуляторы должны быть оснащены средствами защиты от внешних и коротких замыканий.

Таким средством защиты могут быть предохранители многоразового действия (на основе полимерного проводника с положительным температурным коэффициентом сопротивления),

предназначенные для встраивания в конструкцию аккумулятора на этапе изготовления, как правило, под крышку.

При разработке конструкции аккумулятора и в ходе дальнейшей эксплуатации необходимо учитывать особенности функционирования таких предохранителей. Срабатывая при коротком замыкании, предохранитель не разрывает цепь замыкания полностью, пропуская ток до нескольких десятков миллиампер - в зависимости от напряжения аккумулятора. Он остается нагретым до температуры около 125°С, а также незначительно меняет свои размеры вследствие нагревания.

2) Встроенные в ЛИАБ элементы СКЗ.

Можно сказать, что основное назначение предохранителей, встроенных в литиевый аккумулятор - защита от возможного короткого замыкания до момента начала эксплуатации аккумулятора.

В свою очередь, элементы СКЗ, встроенные в ЛИАБ (а также внешние по отношению к ЛИАБ элементы СКЗ), предназначены обеспечивать заданные безопасные режимы функционирования аккумуляторов при эксплуатации батарей.

Во-первых, в состав ЛИАБ также может входить предохранитель. Это может быть как обычный предохранитель, так и многократный предохранитель на основе полимерного проводника. Очевидно, что расположение первого должно предусматривать возможность его удобной замены.

Расположение многократного предохранителя должен быть таким, чтобы его нагрев при срабатывании не вызывал повреждения аккумуляторов и корпуса ЛИАБ. В случае ограниченного внутреннего объема ЛИАБ и осложненного теплообмена с внешней средой неправильное расположение предохранителя может привести к его разрушению вследствие перегрева.

Необходимо учитывать возможное нагревание аккумуляторов и внутренних токоведущих шин, соединяющих аккумуляторы при заряде и разряде большими токами, а также температуру окружающей среды, так как эти факторы, вызывая изменение температуры проводящего материала предохранителя, влияют на ток его срабатывания.

Таким образом, в некоторых случаях для установки многократного предохранителя в ограниченном внутреннем объеме ЛИАБ приходится решать довольно непростую задачу размещения предохранителя, что делает оправданным применение обычного заменяемого плавкого предохранителя.

По этим же причинам применения плавкого предохранителя может быть оправданным и в ЛИАБ с большими токами заряда - разряда, для которых пришлось бы включать параллельно большое количество многократных предохранителей.

Другой основной элемент СКЗ, входящий в состав ЛИАБ, - электронный модуль контроля и управления. Конкретный набор функций такого модуля определяется требованиями к данной ЛИАБ, рассмотренной в составе определенного устройства. При этом ряд необходимых функций может быть исключен или перенесен на элементы СКЗ, не входящих в состав ЛИАБ. Например, в ЛИАБ сотового телефона функция определения емкости

выполняется процессором телефона, а модуль в составе ЛИАБ защищает аккумулятор от перезаряда, переразряда и короткого замыкания. С другой стороны, для высокоемкостных ЛИАБ при ответственных применениях может потребоваться введение дополнительных функций, например:

- контроль внутреннего сопротивления аккумулятора;
- контроль разгерметизации аккумулятора;
- отключение неисправных аккумуляторов из блока аккумуляторов с возможностью «горячей замены»;
- контроль напряжения в различных точках параллельной цепи в случае большого числа параллельно соединенных аккумуляторов (из-за возможного большого падения напряжения на токоведущих шинах).

3) Внешние по отношению к ЛИАБ элементы СКЗ.

В некоторых случаях возможно и необходимо функционально разделить систему контроля и управления на модуль контроля и управления, конструктивно входящих в состав ЛИАБ, а также элементы, располагающиеся вне корпуса батареи - например, в аппаратуре, где используется ЛИАБ.

Для ЛИАБ, состоящий из большого количества последовательно соединенных высокоемких аккумуляторов, для упрощения структуры схемы, целесообразна разработка типового подмодуля на 4-8 аккумуляторов, который выполняет ряд необходимых функций (измерение напряжений на аккумуляторах, выравнивание зарядов) под управлением центрального модуля.

Для выравнивания зарядов последовательно соединенных аккумуляторов, в случае использования специализированных микросхем, широко применяется метод шунтирования аккумулятора, который имеет более высокое напряжение. Для высокоемкостных ЛИАБ с токами заряда от 15-30 А целесообразно обрабатывать альтернативные методы выравнивания зарядов.

Кроме того, в ЛИАБ с большими токами заряда - разряда требуется тщательная грамотная конструкторская проработка узлов подключения СКЗ в бор аккумуляторов для исключения влияния помех на измерительные цепи с одной стороны и, с другой, для исключения негативного влияния узлов подключения измерительных цепей на прохождение тока в силовых цепях (дополнительная клемма измерительного провода на бор аккумулятора при неправильном обработке вариантов крепления может привести к ненужному увеличению нагрева силового проводника).

С целью подтверждения выше изложенного была проведена экспериментальная работа по разработке и изготовлению экспериментального образца - Средства контроля и защиты ЛИАБ на базе микросхемы bq2057csn.

В ходе исследовательских испытаний проверены режимы работы ЛИАБ и измерены ее зарядно-разрядные характеристики.

Результаты испытаний подтвердили правильность выполнения основных функций СКЗ.

На рисунке рис. 1 отражено зависимость значений напряжения от времени заряда АХБ.

Зависимость значений тока от времени заряда АХБ и напряжения отражено на рисунке 2 и 3 соответственно.

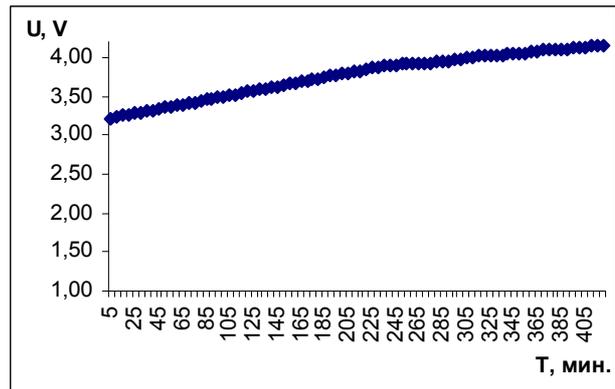


Рис. 1. График заряда АХБ. Зависимость напряжения от времени

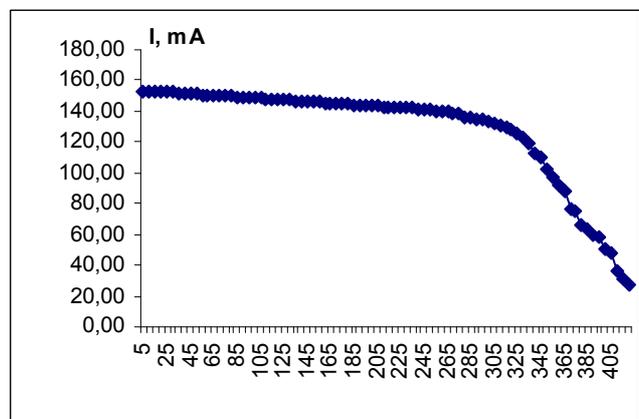


Рис. 2. График заряда АХБ. Зависимость тока от времени

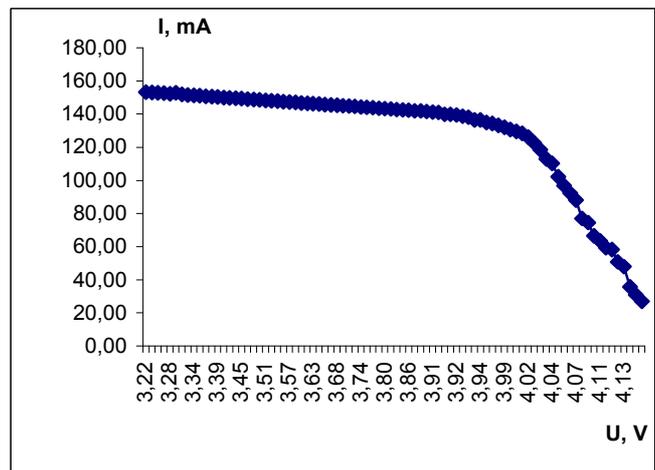


Рис. 3. График заряда АХБ. Зависимость тока от напряжения

### Выводы

Для обеспечения безопасности эксплуатации и повышения эксплуатационных характеристик в состав ЛИАБ должна входить СКЗ, которая обеспечивает контроль параметров аккумуляторов в процессе эксплуатации батареи.

СКЗ в обязательном порядке должна обеспечивать контроль напряжения аккумуляторов и токов заряда - разряда; введение других функций не является

обязательным, но позволяет повысить эксплуатационные характеристики ЛИАБ. Выравнивание напряжения на последовательно соединенных аккумуляторах позволяет эксплуатировать батарею с отдачей максимально возможной емкости, система подсчета емкости позволяет специализированному устройству заряда контролировать заряд батареи, а также дает пользователю возможность оценить время, оставшееся до окончания заряда или разряда. ЛИАБ может хранить информацию о необходимых режимах заряда, которая может быть передана специализированному устройству заряда для установки необходимых режимов.

Возможны различные варианты построения СКЗ - на специализированных микросхемах или на элементной базе общего назначения. Конкретное решение должно быть определено разработчиком после анализа по возможности большего объема соответствующей элементной базы.

В части применения специализированных микросхем для создания СКЗ, учитывая широкую номенклатуру, большой объем постоянно обновляемой технической информации, размещенной на сайте, оперативную техническую поддержку по телефону и электронной почте, одним из оптимальных вариантов для разработчика может быть применение микросхем Texas Instruments.

При разработке СКЗ высокочастотных ЛИАБ для ответственных применений необходимо учитывать потенциальную возможность короткого замыкания внутри аккумулятора, что может привести к его нагреву, деформации и разрушению - это потребует не только электрического исключения неисправного аккумулятора

из состава ЛИАБ, но и защиты соседних аккумуляторов от воздействия опасных температур и механической деформации.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований было рассмотрено построение систем контроля и управления ЛИАБ, определены их основные функции, проведен анализ и систематизация элементов.

На основе проведенного анализа способов эксплуатации АХБ в составе КА и результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать вывод о возможности использования литий - ионных аккумуляторов промышленного изготовления для создания АХБ при условии разработки их средств защиты и контроля, которые соответствуют определенному образу эксплуатации АХБ в составе КА.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Кедринский И.А. *Li-ионные аккумуляторы* / И.А. Кедринский, В.Г. Яковлев. – Красноярск: Платина, 2002. – 266 с.
2. А.В. Чуриков, И.А. Казаринов *Электронный вариант курса лекций „Современные химические источники тока”*, Саратов, 2008, - 49 с.
3. К. В. Безручко, А. О. Давыдов, Т. С. Кадигроб, С. В. Ширинский *Прогнозирование характеристик электрохимических аккумуляторов систем электроснабжения ракетно-космических комплексов// Авиационно-космическая техника и технология, 2008, №6, с. 66-70*
4. *Datasheet BQ2057CSN - Texas Instruments, - 29 с.*