

УДК 621.311, 621.356

**КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ВЫСОКОЭНЕРГОЕМКИХ ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ****А.И. Груздев***ОАО «Авиационная электроника и коммуникационные системы», Москва, Россия*

Поступила в редакцию 15.12.04 г.

Рассмотрены принципы построения систем контроля и управления высокоэнергоемких литиевых аккумуляторных батарей. Проведен анализ методов нивелирования разбаланса напряжения аккумуляторов в батарее.

The principles of the construction the systems of the control and methods of the leveling the voltage cell in lithium storage batteries have been considered.

ВВЕДЕНИЕ

Все более широкое применение в технике находят литий-ионные аккумуляторы (ЛИА). Они активно вытесняют другие типы аккумуляторов в области портативной электроники [1, 2]. Интерес к ним обусловлен прежде всего высокими энергетическими характеристиками, а также доступностью и экологичностью используемых материалов [3]. Серийные образцы ЛИА имеют удельную энергию 110–160 Вт·ч/кг, а объемную энергию от 280 до 400 Вт·ч/л. Недавно появились коммерческие образцы литий-полимерных аккумуляторов (ЛПА), имеющих такие же высокие, как у ЛИА, энергетические характеристики и разрядные мощности, сравнимые с характеристиками электрохимических конденсаторов – ионисторов: токи разряда ЛПА достигают 10–15 С [4, 5]. Имеются публикации о разработке ЛПА с токами разряда порядка 40 С [6].

По сравнению с никель-кадмиевыми и никель-металлогидридными аккумуляторами несомненным преимуществом литиевых аккумуляторов является отсутствие «эффекта памяти», а также более высокое напряжение единичного аккумулятора – 3.6 В против 1.2 В. В то же время их отличает высокая чувствительность к переразряду и перезаряду, а также отсутствие электрохимических процессов, обеспечивающих выравнивание напряжения на отдельных аккумуляторах при их последовательном соединении в батарее и, как следствие, определенные проблемы с обеспечением безопасной эксплуатации [7, 8]. Для обеспечения безопасной и надежной работы литиевых аккумуляторов в составе любой батареи необходимо иметь электронный блок, обеспечивающий контроль и выравнивание напряжения на отдельных аккумуляторах или группе параллельно соединенных аккумуляторов.

В последние годы в США, Европе, Японии и Китае начато производство высокоэнергоемких литиевых аккумуляторов: на рынке имеются коммерческие образцы единичных ЛИА емкостью от 10 А·ч

до 500 и более А·ч, ЛПА – до 100 А·ч [4, 9]. Они являются серьезной альтернативой свинцово-кислотным и никель-кадмиевым аккумуляторам при создании автономных источников энергоснабжения различного применения, в том числе высоковольтных стационарных и тяговых аккумуляторных батарей с мощностью 100 и более кВт.

В феврале 2004 г. в рамках научно-практической конференции в г. Санкт-Петербурге на достаточно высоком уровне было заявлено о важности и актуальности разработки и производстве в России высокоэнергоемких литиевых аккумуляторных батарей (ЛАБ) для систем автономного электропитания военного и гражданского назначения [10]. В частности, отмечалось, что ЛАБ целесообразно использовать в:

- объектах вооружений и военной техники практически всех родов войск;
- аккумуляторном и гибридном электротранспорте, в том числе с электрохимическими генераторами на топливных элементах;
- средствах связи и автоматики железнодорожного транспорта;
- автономных необитаемых подводных аппаратах;
- системах энергоснабжения космических аппаратов.

Общей тенденцией при создании современных аккумуляторных батарей является использование в них микропроцессорных блоков, контролирующих работу батареи [11]. Например, для автомобильных стартерных батарей разрабатываются электронные блоки, контролирующие их разряд [12], для контроля напряжения и температуры литиевых аккумуляторов рядом зарубежных фирм уже налажено производство специализированных микросхем [8, 13]. Очевидно, что обеспечение надежной безаварийной работы высокоэнергоемких ЛАБ, повышение ресурса работы, их технических и эксплуатационных характеристик невозможно без применения многофункциональных микропроцессорных систем Контроля и управления.

Основные функции систем контроля и управления ЛАБ

В общем случае система контроля и управления (СКУ) должна обеспечивать:

- контроль тока, напряжений и температуры аккумуляторов;
- защиту ЛАБ от токовых перегрузок;
- выравнивание напряжения единичных аккумуляторов аппаратно в процессе выполнения зарядно-разрядных циклов;
- отключение или перевод в безопасное состояние отказавших единичных аккумуляторов или групп аккумуляторов;
- выработку управляющих команд для системы терморегулирования ЛАБ;
- прием и обработку внешних управляющих команд, передачу информации о состоянии ЛАБ;
- самотестирование работоспособности блоков, входящих в состав системы контроля ЛАБ.

Принципы построения СКУ высоковольтных многосекционных батарей

СКУ высоковольтных многосекционных ЛАБ целесообразно строить на базе микропроцессорной техники по иерархическому принципу с тремя уровнями управления: верхним, средним и нижним:

- на верхнем уровне управления (уровень ЛАБ) осуществляется общий контроль и управление батареями на уровне аккумуляторных секций (АС), сбор, хранение и аналитическая обработка информации об основных параметрах ЛАБ с целью оптимизации алгоритмов ее управления;
- на среднем уровне управления (уровень АС) отрабатываются команды, поступающие с верхнего уровня управления, и осуществляются общий контроль и управление конкретной АС на уровне аккумуляторных модулей (АМ – 6–10 аккумуляторов соединенных последовательно) и систем, входящих в эту АС;
- на нижнем уровне управления (уровень АМ) отрабатываются команды, поступающие с верхнего уровня управления, и осуществляются непосредственный контроль и управление аккумуляторными модулями в реальном масштабе времени по заданным алгоритмам.

СКУ верхнего уровня управления осуществляет общий контроль и управление ЛАБ на уровне аккумуляторных секций:

- контроль за работоспособностью и управление работой СКУ среднего уровня управления;
- общий контроль за работой (состоянием) АС по принципу «Норма», «Не норма», «Авария» на основе информации, поступающей от СКУ АС; формирование аварийных звуковых и световых сигналов о нештатных и аварийных ситуациях в ЛАБ;
- формирование на основе анализа имеющейся информации (или по внешним командам) управляющих сигналов на включение/отключение определенных АС;

- формирование на основе анализа имеющейся информации в соответствии с заданным алгоритмом работы команд на выполнение профилактических процедур и других действий, связанных с обслуживанием или тестированием работоспособности конкретных АС;

- передача информации о состоянии ЛАБ.

СКУ среднего уровня управления осуществляет общий контроль и управление конкретными АС на уровне блоков и систем, входящих в состав АС:

- контроль напряжения, тока и температуры АС, в том числе и на основе информации, поступающей с нижнего уровня управления;
- общий контроль за работой АМ по принципу «Норма», «Не норма», «Авария» на основе информации, поступающей с нижнего уровня управления;
- выработка информационных сигналов для СКУ верхнего уровня, формирование команд для систем: охлаждения, выравнивания напряжения и подзаряда ЛИА в АМ, проведения тестирования работоспособности АС и др.;
- контроль за работоспособностью аппаратных средств токовой защиты АС.

СКУ нижнего уровня управления осуществляет контроль и управление параметрами АМ в реальном масштабе времени, обработку команд, поступающих от СКУ среднего уровня:

- контроль параметров, необходимых для работы систем: охлаждения, выравнивания напряжения и подзаряда единичных ЛИА;
- выравнивание напряжения единичных ЛИА;
- подзаряд единичных ЛИА.

Параметры, контролируемые СКУ, можно разделить на две группы:

- 1) параметры, передаваемые для анализа состояния АМ на верхних уровнях управления;
- 2) параметры, используемые для непосредственного управления работой АМ в реальном масштабе времени.

К первой группе контролируемых параметров относятся:

- напряжение АМ;
- максимальная температура ЛИА в АМ.

Ко второй группе параметров относятся сигналы выполненных на базе микропроцессоров виртуальных датчиков напряжения и температуры, формирующих дискретные сигналы («Да», «Нет»):

- «Перезаряд»;
- «Переразряд»;
- «Перегрев ЛИА»;
- «Разбаланс напряжений».

Требования к СКУ низковольтных моноблочных ЛАБ

СКУ низковольтных (до 42 В) ЛАБ в минимальном варианте должны обеспечивать при заряде и разряде:

- контроль напряжения отдельных аккумуляторов и батареи в целом;

- контроль величины тока и температуры аккумуляторов в батарее;
- ограничение величины тока или отключение батареи от нагрузки или зарядного устройства при превышении величины тока, температуры аккумуляторов или скорости нарастания температуры максимально допустимых значений;
- отключение батареи при отклонении напряжения отдельных аккумуляторов или батареи в целом от допустимых значений.

В расширенном варианте СКУ также должна обеспечивать:

- выравнивание степени заряженности отдельных аккумуляторов в батарее;
- контроль и индикацию зарядной и разрядной емкости;
- оптимизацию алгоритма заряда батареи в зависимости от внешних факторов;
- подсчет количества зарядно-разрядных циклов;
- хранение информации о работе батареи в течение всего времени ее эксплуатации;
- сигнализацию (или отключение батареи) о выработке ресурса работы, установленного производителем батареи;
- обмен данными с внешними устройствами;
- другие функции.

Причины и методы разбаланса напряжения в ЛАБ

Причиной появления разбаланса напряжений в батарее является различие в степени заряженности ЛИА из-за разных скоростей их саморазряда. Саморазряд обусловлен как токами утечек через их внешние и внутренние электрические цепи, так и электрохимическими процессами, протекающими на электродах ЛИА.

Среди методов выравнивания напряжения в батареях ЛИА следует отметить:

- параллельный заряд ЛИА;
- заряд батареи с отключением заряженных до заданного напряжения ЛИА от зарядной цепи;
- выравнивание напряжения при заряде за счет шунтирования ЛИА электронной схемой;
- выравнивание напряжения аккумуляторов при заряде и (или) разряде батареи за счет перераспределения энергии между единичными ЛИА в батарее с использованием трансформаторных схем;
- подзаряд аккумуляторов, напряжение которых меньше среднего значения по батарее, от внешнего источника энергии.

Для нивелирования напряжения низковольтных (до 42 В) батарей наиболее простым и надежным, с точки зрения схемотехнического исполнения, является *параллельный заряд ЛИА*. В цепочке последовательно соединенных ЛИА каждый аккумулятор заряжается индивидуально от ЗУ сначала постоянным (стабилизированным) током до напряжения $U_{\text{макс}}$, а затем падающим током при $U_{\text{макс}}$ с окон-

чанием заряда или по времени заряда, или при уменьшения тока до заданной величины $I_{\text{мин}}$. Аппаратно этот метод может быть реализован в нескольких вариантах.

- Перекоммутация ЛИА с последовательной схемы на параллельную схему производится с использованием управляемых ключевых элементов и дальнейшего ее заряда от одного ЗУ. Возможно использование многоканального ЗУ, обеспечивающего ограничение зарядного тока в цепи каждого ЛИА [14].
- Использование ЗУ с гальванически развязанными выходами для заряда всех ЛИА, соединенных в батарее последовательно. При этом ЛИА могут подключаться к своему ЗУ непосредственно или через управляемые ключевые элементы [15].

Заряд ЛАБ с отключением ЛИА от зарядной цепи целесообразно применять для высоковольтных батарей. При этом последовательно соединенные ЛИА заряжаются постоянным (стабилизированным) током до тех пор, пока напряжение на одном из ЛИА не достигнет максимального напряжения. После этого данный ЛИА отключают с помощью управляемых ключевых элементов от зарядной цепи и продолжают заряд оставшейся части ЛИА, последовательно выводя из зарядной цепи аккумуляторы с максимальным напряжением. Затем зарядный ток ступенчато уменьшают, восстанавливают последовательную цепь аккумуляторов и повторяют вышеописанный цикл заряда ЛАБ несколько раз, чтобы достигнуть необходимого уровня ее заряженности.

По сравнению с параллельным зарядом в случае заряда с отключением ЛИА усложняется СКУ, но требуется более простое и дешевое ЗУ. Кроме того, система коммутации ЛИА позволяет:

- при разряде отключать наиболее разряженные аккумуляторы, обеспечивая более полный разряд остальных аккумуляторов в ЛИА;
- повысить надежность работы ЛАБ, обеспечивая дистанционный вывод из состава ЛАБ отказавших ЛИА.

Последовательный заряд ЛИА может осуществляться и без их вывода из зарядной цепи при *шунтировании ЛИА электронной схемой*. В отличие от предыдущего метода заряженные ЛИА остаются в зарядной цепи, но к ним параллельно с помощью управляемого ключевого элемента подключается электронная схема, обеспечивающая стабилизацию его напряжения при заряде оставшейся части ЛАБ [11, 16]. Заряд ЛАБ продолжается до тех пор, пока напряжение на всех ЛИА не достигнет заданного значения. Затем зарядный ток ступенчато уменьшают, и повторяют вышеописанный цикл заряда ЛИА до достижения необходимого уровня ее заряженности. По сравнению с методом отключения ЛИА от зарядной цепи этот метод более прост в аппаратной реализации, но связан с повышенными потерями энергии в ЛАБ и, как следствие, требует более сложной системы охлаждения.

Наиболее перспективными, но сложными в схемотехнической реализации являются *трансформаторные схемы выравнивания напряжений в батарее*. Например, в [17] предложено устройство нивелирования разбаланса напряжений, содержащее трансформатор с рабочими обмотками на одном сердечнике, число которых соответствует числу аккумуляторов. При этом каждая из рабочих обмоток имеет одинаковое число витков. Последовательно с каждой рабочей обмоткой и соответствующим аккумулятором соединен управляющий ключевой элемент. Устройство имеет систему управления ключевыми элементами, выполненную в виде коммутирующего источника питания, соединенного с выводами ЛИА, генератора импульсов и формирователя импульсов управления. Кроме того, устройство содержит систему размагничивания трансформатора, источник питания и драйвер управления, установленный в системе управления. Система размагничивания трансформатора выполнена в виде рекуперационных обмоток и диодов, число которых соответствует числу рабочих обмоток. Описанное выше устройство выравнивает разбаланс напряжений на отдельных аккумуляторах в ЛИА во всех режимах ее эксплуатации при токах выравнивания до 100 мА. Питание устройства может осуществляться как от самой ЛИА, так и от внешнего источника питания.

Аппаратно *выравнивание разбаланса напряжений в батарее от внешнего источника энергии* может реализовываться несколькими методами [18]. Выравнивающее устройство может иметь один источник постоянного тока (подзарядное устройство), питающийся от внешнего источника энергии (стационарной сети переменного тока, отдельной аккумуляторной батареи или батареи топливных элементов [19]) и подключаемый к ЛИА через коммутатор. Подзарядное устройство может иметь и гальванические развязанные выходы по количеству ЛИА в батарее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Система контроля и управления низковольтных литиевых аккумуляторных батарей должна обеспечивать поэлементный контроль напряжения и температуры, устранять разбаланс напряжений, а также обеспечивать выполнение ряда сервисных функций при эксплуатации батареи.

2. Систему контроля и управления высоковольтной многосекционной батареей целесообразно строить на базе микропроцессорной техники по иерархическому принципу с тремя уровнями управления.

- На верхнем уровне должен осуществляться общий контроль и управление аккумуляторными секциями, направленные на обеспечение безотказности и безаварийности работы, повышение срока службы батареи. Также целесообразно организовать долговременное хранение и обработку информации

об основных параметрах батареи с целью повышения удобства проведения регламентных и ремонтно-восстановительных работ, а также корректировки алгоритмов управления батареей в зависимости от состояния ее блоков и систем.

- На среднем уровне для каждой аккумуляторной секции должно осуществляться общее управление и контроль за работой блоков подзаряда и выравнивания напряжения в группах аккумуляторов (модулях), системами терморегуляции и защиты от токовых перегрузок и перегрева.

- На нижнем уровне управления должны непосредственно осуществляться измерение и выравнивание напряжения, а также контроль температуры аккумуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов С. Элементы питания – ХИТЫ // Электронные компоненты. 2000. №4. С.54.
2. Таганова А.А., Пак И.А. Герметичные химические источники тока для портативной аппаратуры. СПб.: Химиздат, 2003.
3. Скундин А.М., Ефимов О.Н., Ярмоленко О.В. // Успехи химии. 2002. Т.71, №4. С.378.
4. Орлов С.Б., Суслов В.М., Тарасов В.Н. // Материалы VIII Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах». Екатеринбург: Издат. дом «Зебра», 2004. С.6.
5. Прякин С. // Компоненты и технологии. 2002. №2. С.8.
6. Пат. №6479186 США, МПК H01 M 2/32 / Литиевый аккумулятор для использования на транспортном средстве. Оpubл. 12.11.2002 г.
7. Кедринский И.А., Яковлев В.Г. Li-ионные аккумуляторы. Красноярск: ИПК «Платина», 2002.
8. Щукин А., Воронин С. // Силовая электроника. 2004. №1. С.76.
9. Краснобрыжий А.В. // Материалы VIII Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах». Екатеринбург: Издат. дом «Зебра», 2004. С.15.
10. Перспективы развития и применения литий-ионных источников тока: Материалы науч.-практ. конф. СПб.: «Отраслевые журналы», 2004.
11. Пат. 6608470 США, МПК H 02 J 7/00 / O.J. Wendell, A.J. Burns, M. Georgina. Оpubл. 17.06.2004.
12. Заявка Германии 10235139.2 Германия, МПК G 01 R 31/36 / A.G. Procos, P. Adelman, M. Adema. Оpubл. 19.02.2004.
13. Пат. США 6580250, МПК H 01 M 10/46 / A. Stellberger, M. Keller, R. Hulss, F. Kronmuller. Оpubл. 17.06.2004.
14. Пат. на изобретение по заявке 2002132809 РФ, МПК H 01 M10/44 / А.И. Груздев, А.В. Кузовков. Полож. решение от 05.09.2004.
15. Вдовин Н.Н. и др. Материалы VIII Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах». Екатеринбург: Издат. дом «Зебра», 2004. С.58.
16. Груздев А.И. и др. Материалы VIII Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах». Екатеринбург: Издат. дом «Зебра», 2004. С.55.
17. Пат. на полезную модель 37884 РФ, МПК H 01 M10/44 / А.И. Груздев, А.В. Кузовков, Б.М. Пашов, С.И. Яблочкин. Оpubл. 10.05.2004.
18. Пат. на изобретение 2230418 РФ, МПК H01M10/44 / А.И. Груздев, А.В. Кузовков. Оpubл. 10.06.2004.
19. Пат. 6624616 США, МПК H 02 J 7/04 / M.D.Ferking, J.K. Parker, A. Watts. Оpubл. 23.09.2003.