

Системы контроля литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторных батарей

В настоящее время в состав аккумуляторных батарей различных электрохимических систем может входить электронный блок со схемой контроля параметров этих источников питания. В батареях на основе литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов такой блок должен присутствовать в обязательном порядке. Это позволяет повысить безопасность эксплуатации батареи, реализовать наиболее эффективные методы заряда, предоставлять пользователю напрямую или через устройство, в состав которого входит батарея, информацию о текущей емкости, времени до окончания заряда или разряда, другую полезную информацию и, в целом, повысить эксплуатационные характеристики аккумуляторной батареи. Схемы контроля могут быть построены либо на основе специализированных интегральных микросхем, либо на элементной базе общего назначения.

Никита БРОВКА

Термины и определения

Аккумулятор – единичный аккумуляторный элемент без внешних элементов системы контроля и управления, предназначенный, в частности, для комплектования аккумуляторных батарей.

Блок аккумуляторов – два и более аккумуляторов, соединенных между собой определенным образом электрически и механически для обеспечения требуемых емкости, напряжения, габаритов. При разработке аккумуляторных батарей на основе литий-ионных и литий-полимерных элементов аккумуляторы могут быть соединены в параллельные цепочки, которые, в свою очередь, могут быть соединены последовательно.

Аккумуляторная батарея (АБ):

- Одноэлементная АБ – изделие, в котором объединены в конструкцию единичный аккумулятор (в случае параллельного соединения нескольких аккумуляторов представляем их как единичный «составной аккумулятор»), при необходимости СКУ или ее часть, электрические соединители для подключения внешних цепей заряда, разряда, другие необходимые элементы;
- Многоэлементная АБ – изделие, включающее блок аккумуляторов, в котором имеются последовательно соединенные элементы (в случае параллельного соединения нескольких аккумуляторов представляем их как единичный «составной аккумулятор»), при необходимости СКУ или ее часть, электрические соединители для подключения внешних цепей заряда-разряда, другие необходимые элементы. Система контроля и управления (СКУ) – некоторый набор элементов, обеспечивающий (общий случай):
 - Отслеживание заданных параметров аккумуляторов и аккумуляторной батареи (например, значений напряжений, токов, температур). Конкретные необходимые параметры определяются разработчиком аккумуляторной батареи, а при разработке ее под конкретного заказчика – и с учетом требований заказчика.
 - Определенный алгоритм функционирования аккумуляторной батареи с целью ее безопасной эксплуатации и повышения эксплуатационных характеристик (например, аварийное отключение аккумуляторов АБ от внешних цепей заряда или разряда при чрезмерных токах; повторное подключение при установке уровней, соответствующих допустимым).
 - Передачу пользователю информации (визуально или через интерфейс связи) о значениях контролируемых параметров.
 - Возможность изменения пользователем установок контролируемых параметров.
 - Выполнение иных задаваемых разработчиком АБ функций для обеспечения оптимальных режимов заряда, разряда, а также потребительских характеристик.

Здесь необходимо отметить, что СКУ – не всегда единый блок или модуль. В некоторых случаях целесообразно разделить систему на составляющие, часть которых может представлять конструктивно не связанные с АБ модули.

Необходимость применения СКУ для АБ на основе литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов (ЛИАБ)

При эксплуатации ЛИАБ необходимо учитывать следующие факторы.

Литий – химически активный элемент. В современных аккумуляторах при номинальной эксплуатации в чистом виде отсутствует, однако при нештатных ситуациях (чрезмерные токи заряда или разряда, токи короткого замыкания, перезаряд выше или перезаряд ниже определенных уровней напряжения на аккумуляторах) может выделяться на внутренних электродах аккумулятора, что в определенных случаях может привести к воспламенению и взрыву [1].

ЛИАБ допускают формирование параллельных цепочек из n аккумуляторов для обеспечения необходимой емкости. Требуемое напряжение ЛИАБ обеспечивается последовательным соединением отдельных аккумуляторов или цепочек из n параллельно соединенных аккумуляторов. Таким образом, при соединении аккумуляторов по параллельно-последовательной схеме возможно построение ЛИАБ заданной емкости и напряжения. При этом, однако, каждый аккумулятор или каждая цепочка параллельно соединенных аккумуляторов требуют определенного контроля. При заряде ЛИАБ из последовательно соединенных аккумуляторов (или последовательно соединенных цепочек из n параллельных аккумуляторов) заряд отдельных элементов происходит неравномерно, что вызвано технологическим разбросом внутренних сопротивлений аккумуляторов, либо неравномерным снижением емкости аккумуляторов вследствие их старения в процессе эксплуатации. Аккумуляторы со сниженной емкостью или высоким внутренним сопротивлением имеют тенденцию к большим колебаниям значений напряжения во время заряда и разряда [2]. При строго фиксированных конечных напряжениях заряда и разряда для отдельного аккумулятора увеличивающаяся от цикла (заряд-разряд) к циклу разница зарядов будет приводить к постепенно возрастающему недозаряду и недоразряду ЛИАБ, то есть, фактически, к снижению отдаваемой ЛИАБ емкости [3].

При заряде и разряде необходимо обеспечивать защиту аккумуляторов от перегрева.

Для удобства эксплуатации потребителю или системе, в состав которой входит ЛИАБ, желательно получать информацию о текущей емкости ЛИАБ, времени до окончания заряда или разряда, значения других параметров.

Необходимость применения СКУ, следовательно, продиктована необходимостью решения этих и других вопросов, возникающих при эксплуатации ЛИАБ.

Элементная база

Реализация в СКУ необходимых функций может быть обеспечена либо с использованием элементной базы общего назначения, либо 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, отключающими 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 СКУ может быть значительно проще. Примеры: сложная многофункциональная СКУ в составе ЛИАБ ноутбука с возможностью считывания параметров аккумуляторов и батареи через SMBus-интерфейс и СКУ ЛИАБ фотоаппарата или сотового телефона, реализующая минимально необходимую защиту аккумулятора по основным параметрам.

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 СКУ батареи с 2-4 последовательно соединенными аккумуляторами.

СКУ на микросхемах bq29312, bq20z80 обеспечивает защиту аккумуляторов от перезаряда, переразряда, перегрузки по току и короткого замыкания во внешних цепях (путем отключения аккумуляторов от одного из полюсов ЛИАБ), выполняет выравнивание зарядов последовательно

соединенных аккумуляторов, производит расчет текущей емкости ЛИАБ с учетом саморазряда при хранении.

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

Функционально аналогичные микросхемы имеются также у ряда других изготовителей микросхем – Maxim-Dallas Semiconductor, Linear Technology, Microchip Technology, Mitsumi, Xicor. Однако Texas Instruments предлагает, вероятно, самый большой выбор микросхем для разработчиков СКУ как 1-элементных, так и 2-4 элементных ЛИАБ.

Для повышения надежности функционирования Texas Instruments предлагает формировать в СКУ два независимых канала контроля напряжений 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, отключающего блок аккумуляторов от одного из выводов ЛИАБ в случае несрабатывания (неисправности) схемы защиты первого уровня (bq29312, силовые ключи).

Функционально менее сложные СКУ могут быть реализованы, например, на UCC3952-x (Texas Instruments) или на MC33349 (ON Semiconductor). Это примеры специализированных микросхем, обеспечивающих контроль минимума необходимых параметров аккумулятора одноэлементной ЛИАБ. При построении СКУ на микросхемах такого типа следует иметь в виду, что силовые ключи, отключающие аккумулятор от цепей заряда и разряда, могут либо входить в состав микросхемы (UCC3952-x), либо быть внешними (MC33349). Использование внешних ключей предоставляет разработчику возможность применения СКУ в ЛИАБ с более высокими токами заряда-разряда, а также дает возможность использования этих же 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 СКУ ряда аккумуляторных батарей относительно небольшой емкости (вследствие определенной организации таких микросхем, например, длина ячейки памяти bq20z80 для записи текущей емкости в миллиампер-часах равняется двум байтам); для высокотоковых 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. На случай длительного хранения ЛИАБ желательно иметь возможность перевода микросхем СКУ в «спящий» режим. Для увеличения времени хранения ЛИАБ без подзаряда ток потребления СКУ в целом должен быть ниже тока саморазряда ЛИАБ. Вариант, удобный для практического применения, – MSP430xxxx(x) от Texas Instruments (очень низкий ток потребления, достаточное количество портов ввода-вывода, большой объем памяти, встроенные ЦАП, АЦП, компараторы, интерфейсные модули, драйвер ЖКИ) [4].

Для высокотоковых 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 СКУ для батарей специального назначения специализированные микросхемы, функционально пригодные к использованию, не предназначены для работы в требуемом диапазоне температур.

При разработке СКУ на специализированных микросхемах, равно как и при разработке СКУ 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), либо использование индуктивных датчиков тока, оптимизация расположения нагреваемых элементов в корпусе ЛИАБ. При практической разработке была доработана типовая схема включения пары bq29312-bq20z80 для замены р-канальных транзисторов на n-канальные, имеющие более низкое

сопротивление канала. Решение позволило уменьшить габаритные размеры СКУ, обеспечив необходимые тепловые режимы работы.

Построение СКУ ЛИАБ

Элементы СКУ условно можно разделить на три группы:

1) *Встроенные в аккумулятор элементы СКУ*

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 аккумулятора типоразмера АА) емкостью 1800 мА·ч значение тока составит 50-60 А.

Для защиты от последствий протекания таких токов аккумуляторы могут быть (а в соответствии с правилами авиаперевозок – должны быть) оснащены средствами защиты от внешних коротких замыканий [5].

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 изменяет свои размеры вследствие нагрева [6].

2) *Встроенные в ЛИАБ элементы СКУ*

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

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

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

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

Необходимо учитывать возможный нагрев 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 [6].

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

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

Другой основной элемент СКУ, входящий в состав ЛИАБ, – электронный модуль контроля и управления. Конкретный набор функций такого модуля определяется требованиями к данной ЛИАБ, рассматриваемой в составе определенного устройства. При этом ряд необходимых функций может быть исключен или перенесен на не входящие в состав ЛИАБ элементы СКУ. 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 высокоемких ЛИАБ в случае ответственных применений может потребоваться введение дополнительных функций, например:

- контроль внутреннего сопротивления аккумулятора;

- контроль разгерметизации аккумулятора;
- выключение неисправных аккумуляторов из блока аккумуляторов с возможностью их «горячей замены»;
- контроль напряжений 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 СКУ*

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

Пример такого разделения – рассмотренная выше ЛИАБ сотового телефона. Здесь в состав батареи входит многократный предохранитель и электронный модуль на основе специализированной микросхемы МС33349, обеспечивающий защиту аккумулятора от перезаряда, переразряда, чрезмерных токов заряда-разряда и короткого замыкания. Другие необходимые функции (определение емкости аккумулятора) выполняются процессором телефона.

Очевидно, что включение схемы измерения емкости в ЛИАБ привело бы к ненужному увеличению ее стоимости и габаритов.

Другой пример – часть СКУ, выполняющая выравнивание зарядов аккумуляторов батареи, конструктивно может не входить в ЛИАБ и представлять собой либо отдельный блок, либо входить в состав зарядного устройства. Это может быть необходимо при жестких требованиях к габаритам АБ, но не всегда оправдано, так как требует введения в кабель, соединяющий устройство заряда (или отдельный блок балансировки) и ЛИАБ, как минимум $(n-1)$ дополнительных проводов, а при высоких токах заряда и выравнивания – для исключения влияния падения напряжения на проводах на точность измерения напряжений – еще $(n+1)$ проводов, где n – число последовательно включенных аккумуляторов ЛИАБ.

Для ЛИАБ, состоящей из большого числа последовательно соединенных высокоемких аккумуляторов (ЛИАБ электромобиля может содержать до 70 последовательно соединенных аккумуляторов) для упрощения структуры схемы целесообразна разработка типового подмодуля на 4-8 аккумуляторов, выполняющего 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, имеющего более высокое напряжение [3]. Для высокоемких ЛИАБ с токами заряда от 15-30 А целесообразно проработать альтернативные методы выравнивания зарядов [2].

Кроме того, в ЛИАБ с большими токами заряда-разряда необходима тщательная, грамотная конструкторская проработка узлов подключения СКУ к борнам аккумуляторов для исключения влияния помех на измерительные цепи с одной стороны и, с другой, для исключения отрицательного влияния узлов подключения измерительных цепей на прохождение тока в силовых цепях (дополнительная клемма измерительного провода на борне аккумулятора при неправильной проработке варианта крепления может привести к ненужному увеличению нагрева силового проводника).

Выводы

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

СКУ в обязательном порядке должна обеспечивать контроль напряжений аккумуляторов и токов заряда-разряда; введение других функций обязательным не является, но позволяет повысить эксплуатационные характеристики ЛИАБ. Выравнивание напряжений 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 СКУ – на специализированных микросхемах или на элементной базе общего назначения. Конкретное решение должно быть определено разработчиком после анализа по возможности большего объема подходящей элементной базы.

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

Необходимо заметить, что все обозначенные здесь решения обеспечивают защиту аккумуляторов и ЛИАБ от короткого замыкания во внешних относительно аккумулятора и аккумуляторной батареи цепях заряда-разряда. При разработке СКУ высокотоковых ЛИАБ для ответственных применений необходимо принимать во внимание 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.

Литература

- 1 www.buchmann.ca
- 2 Moore S. W., Schneider P. J. A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems. Society of Automotive Engineers. 2001.
- 3 Martinez C., Sorlien D., Goodrich R., Chandler L., Magnuson D. Using Cell Balancing to Maximize the Capacity of Multi-cell Li-Ion Battery Packs. AN167. www.xicor.com
- 4 www.ti.com
- 5 Transportation Regulations for Lithium, Lithium Ion and Polymer Cells and Batteries. www.ultralifebatteries.com
- 6 Circuit Protection Databook. Tyco Electronics Raychem.