

# Системы баланса

## Li-ion аккумуляторных батарей

**Аккумуляторные батареи на основе Li-ion аккумуляторов все чаще используются как в промышленности, военной технике, так и в бытовых приборах.**

**К их достоинствам можно отнести: высокие удельные характеристики, герметичность, большое количество циклов заряд/разряд (до 1000) и т. д. Производятся аккумуляторы емкостью до 300 А·ч (и более), существуют и опытные образцы емкостью до 1000 А·ч. Однако проектирование и эксплуатация аккумуляторной батареи, состоящей из последовательно соединенных аккумуляторов, требует определенных знаний. Речь в статье пойдет о системах баланса таких батарей.**

**Алексей Рыкованов**  
rycovanalex@yandex.ru

**Н**еобходимость балансировать (nivelировать) напряжения на Li-ion аккумуляторах в батарее вытекает из следующих соображений:

- Напряжение, ниже которого мы не можем разрядить отдельно взятый аккумулятор в батарее, состоящей из последовательно соединенных аккумуляторов, лежит в пределах 2,4–2,8 В (в зависимости от рекомендаций их производителя).
- Напряжение, выше которого мы не можем зарядить отдельно взятый аккумулятор, лежит в пределах 4,1–4,3 В.

Работа в указанных пределах напряжений дает гарантию долгой и безопасной эксплуатации аккумуляторов, за этим обычно «следит» контроллер аккумуляторной батареи.

В аккумуляторную батарею (АБ) стараются подобрать аккумуляторы, близкие по емкости (например, батарея может состоять из 4 аккумуляторов емкостью 10,12; 10,17; 10,19 и 10,21 А·ч). При сборке АБ учитывают, что напряжения на аккумуляторах должны иметь как можно более близкие значения (для нашего примера: 3,785; 3,784; 3,783 и 3,782 В). Однако зарядить их до определенного напряжения можно с некоторой точностью (например,  $\pm 0,01$  В). К тому же, сами аккумуляторы, даже вышедшие с конвейера друг за другом, имеют немного отличающиеся характеристики: внутреннее сопротивление, токи саморазряда в режиме хранения, скорость деградации электронных материалов и т. д.

При заряде/разряде все эти факторы приводят к появлению «окна», которое равно разности между напряжениями самого заряженного и самого разряженного аккумулятора (рис. 1), то есть напряжения, которые были примерно одинаковыми для всех аккумуляторов вначале, постепенно «разбегаются». При расширении этого «окна» емкость самой батареи начинает снижаться, поэтому заряд батареи необходимо будет прекратить, как только один из аккумуляторов достигнет конечного зарядного напряжения, то же самое произойдет и при разряде. В конечном итоге из-за расширения «окна» емкость самой батареи может достигнуть нуля, если не предпринимать определенных мер. Хотя как-то выйти из положения и продлить срок эксплуатации батареи без вмеша-

тельства извне может помочь система сведения этого «окна» к минимуму.

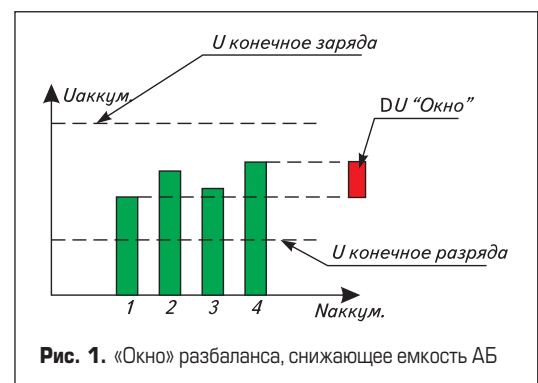
Системы баланса (СБ) можно разделить на несколько классов, которые взаимно пересекаются, дополняют друг друга, поэтому иногда трудно найти нужное решение при проектировании аккумуляторной батареи.

Системы баланса можно разделить по способу управления:

- управляемые;
- автономные.

Автономные системы баланса могут работать постоянно при заранее заданных условиях (например, в определенном диапазоне напряжений на аккумуляторной батарее), вне зависимости от того, идет заряд, разряд или батарея находится в режиме покоя, и даже вне зависимости от того, есть ли разбаланс на аккумуляторах (если разбаланс нет, то СБ работает вхолостую, разряжая батарею в режиме хранения, тогда ее лучше отключить). Автономные СБ могут работать и в определенные периоды времени, например, только при заряде АБ, имея свой датчик тока. Автономность здесь означает прежде всего то, что система баланса не зависит от других электронных блоков, входящих в состав или обеспечение аккумуляторной батареи, и работает самостоятельно как отдельный блок.

Отсюда вытекают преимущества такой системы баланса. Автономные СБ обычно более просты как по своему строению, изготовлению, ремонту, так



**Рис. 1.** «Окно» разбаланса, снижающее емкость АБ

и при их модернизации. Когда автономная СБ функционирует как отдельный блок (рис. 2), ее можно протестировать и в случае необходимости отключить или заменить, не затрагивая работу всей системы, просто выдернув такую СБ из соединительного разъема. Поэтому саму систему контроля АБ можно значительно упростить, она будет следить только за напряжениями на отдельных аккумуляторах в составе АБ и током, протекающим через датчик тока. (В данном случае в качестве датчика тока используется сенсорный резистор  $R_{sns}$ ). Устройство контроля управляет силовыми ключами (обычно это MOSFETы, для батарей небольшой емкости или с малыми токами разряда). Простейшую схему построения СБ можно рассмотреть на примере АБ, состоящей из двух аккумуляторов (рис. 3).

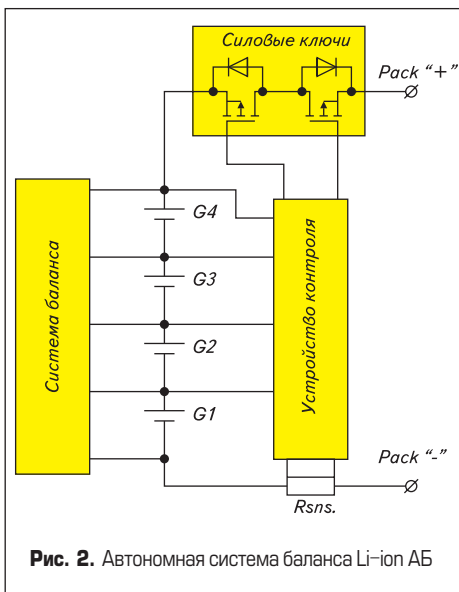


Рис. 2. Автономная система баланса Li-ion АБ

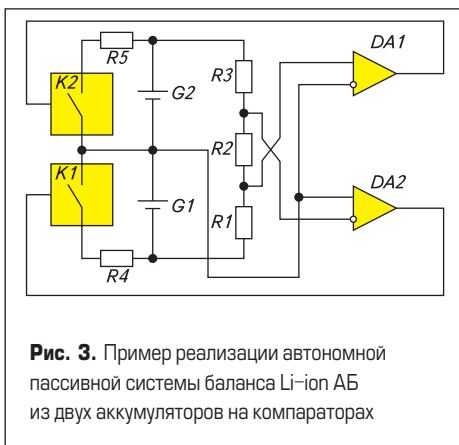


Рис. 3. Пример реализации автономной пассивной системы баланса Li-ion АБ из двух аккумуляторов на компараторах

Компараторы DA1 и DA2 сравнивают напряжение общей точки G1 и G2 с общим напряжением на батарее и управляют балансировочными ключами K1 и K2 в зависимости от напряжений на аккумуляторах. Аккумулятор G1 (или G2) разряжается на резистор R4 (или R5).

К недостаткам автономных СБ можно отнести невысокую точность нивелирования аккумуляторов, из-за достаточно простого построения таких СБ. Если автономную СБ сделать, например, на основе более сложных средств измерения напряжения, то такая система станет избыточной, и блок измерения напряжений будет дублироваться, как в СБ, так

и в контроллере управления АБ. (Хотя такой вариант не исключен полностью, все зависит от целей построения стратегии модернизации.)

Управляемые СБ, в отличие от автономных, не функционируют как отдельный блок, а управляются извне устройством (обычно модулем контроля и управления (МКУ) работой АБ). В зависимости от того, каким образом построена СБ и каков алгоритм работы МКУ, она может функционировать как на заряде, так и при определенных условиях на разряде и в режиме покоя. Управляя СБ извне и имея более сложный алгоритм управления в самом МКУ, можно добиться лучших результатов по нивелированию аккумуляторов в составе АБ. Для экономии энергии АБ в период покоя МКУ может отключить физически СБ от питания, а при необходимости — снова включить СБ и управлять нивелированием отдельных аккумуляторов.

По своему строению управляемые СБ в общем случае более сложные: не только по способу управления — необходим алгоритм управления, но и по физическому исполнению. Они оснащены дополнительными элементами управления, имеют дополнительные проводники (или разъем со шлейфом проводов) от МКУ.

Пример построения управляемой СБ представлен на рис. 4. Хотя эта схема и выглядит проще, чем пример неуправляемой СБ, тем не менее, в состав АБ должен входить контроллер (обычно микроконтроллер), имеющий свой алгоритм управления такой СБ. Балансировочные резисторы R1–R4 замыкаются ключами K1–K4 по команде устройства контроля.

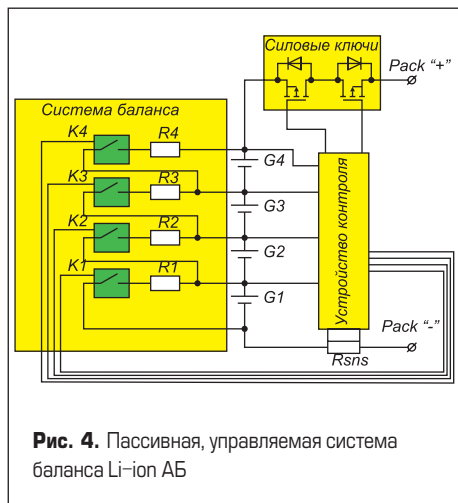


Рис. 4. Пассивная, управляемая система баланса Li-ion АБ

Следующее разделение по способу размещения:

- в составе АБ;
- вне состава АБ.

В составе АБ, СБ, входящие в состав АБ, являются неотъемлемой частью батареи и располагаются внутри корпуса вместе с аккумуляторной сборкой, а чаще всего на одной плате с модулем контроля (МКУ). Особенность таких СБ — их относительная компактность, то есть незначительные масса и габариты по сравнению со всей АБ (для батарей важный показатель — удельные параметры: Вт·ч/кг, Вт·ч/дм³). Из этого следуют отличия таких СБ: они имеют малые токи нивелирования (след-

ствие ограниченности массо-габаритных параметров, отведенных под СБ при проектировании АБ). Действительно, при стационарной системе можно позволить, чтобы СБ была сравнима по весу и габаритам с зарядным устройством, но при создании переносных приложений вряд ли кто-нибудь будет мириться с этим.

Малые токи нивелирования (от сотен мкА до сотен мА) компенсируются тем, что СБ постоянно расположена рядом с аккумуляторами. АБ чаще всего находится в режиме покоя. (Обычно период заряда/разряда относительно невелик по сравнению с периодом покоя. Поэтому, обходясь небольшими токами нивелирования, СБ удается предотвратить «разбегание» аккумуляторов за счет более длительного времени балансирования, если СБ работает в режиме покоя АБ, или более длительного времени заряда. Ток заряда при этом выбирается в пределах 0,07–0,15 Сн от емкости АБ).

Если в состав АБ входит встроенная СБ, то при достаточно большом разбалансе напряжений на аккумуляторах АБ необходимо заряжать малым током длительное время. Отношение тока заряда к току баланса выбирается таким, чтобы МКУ было чувствительно к зарядному току и четко идентифицировало, что происходит заряд и время заряда приемлемо (например, не более 24 часов).

Встроенные в АБ СБ чаще всего конструктивно изготавливаются из резистора и управляемого от МКУ ключа (для одного аккумулятора), замыкающего резистор N-го аккумулятора. Такие системы работают обычно только при заряде (рис. 4).

Встроенные СБ имеют свою нишу в построении АБ на основе Li-ion аккумуляторов. С одной стороны, они практически не увеличивают массо-габаритные показатели всей АБ (при емкости АБ не более 15 А·ч), упрощают структуру зарядного устройства (ЗУ), но, с другой стороны, для их эффективного использования необходимо увеличивать время заряда. Эти проблемы можно решить с помощью размещения СБ вне АБ.

Вне состава АБ, СБ за пределами АБ уже не предъявляются жесткие требования по массо-габаритным показателям, поэтому такие СБ имеют токи нивелирования более высокие, чем при встроенной СБ. Спроектировать СБ вне АБ можно так, что она позволит нивелировать практически любой разбаланс чуть ли не за один цикл заряда номинальным током.

Конструктивно СБ вне состава АБ чаще всего располагается в одном корпусе с зарядным устройством (ЗУ). Такие СБ также могут быть как управляемыми, так и неуправляемыми, и создаются по различным способам балансирования (пассивные или активные).

К достоинствам СБ вне АБ можно отнести уменьшение массо-габаритных показателей АБ за счет выноса СБ за границы АБ. К недостаткам — увеличение тех же параметров ЗУ и количества проводников (жил), идущих от ЗУ к АБ (для N аккумуляторов дополнительно N+1 жила), а также контактов в выходном разъеме АБ. К тому же, каждый выведенный контакт от аккумулятора необходимо защищать как минимум предохранителем (плавким или самовосстанавливающимся),

чтобы пользователь по неосторожности не замкнул эти концы при присоединении ответной части разъема. Сами предохранители должны находиться внутри АБ, что также занимает место и пространство внутри АБ, особенно при числе аккумуляторов более двух.

Если СБ управляется от внутреннего контроллера АБ, то число контактов в разъеме заряда необходимо будет увеличить или ввести одно- или двухпроводный интерфейс обмена данными между СБ и контроллером АБ. Дополнительный интерфейс обмена данными также усложнит всю систему, как аппаратно, так и программно.

Пример неуправляемой СБ вне АБ показан на рис. 5.

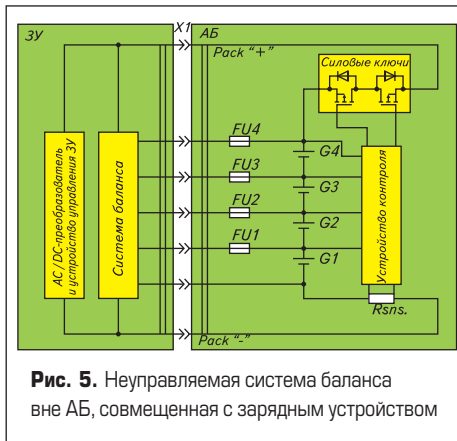


Рис. 5. Неуправляемая система баланса вне АБ, совмещенная с зарядным устройством

АБ соединяется с зарядным устройством и с СБ через разъем X1. СБ питается от ЗУ, отбирая часть тока на свои нужды, что необходимо учесть при проектировании ЗУ. Предохранители FU1–FU4 служат элементами защиты. Балансирование аккумуляторов осуществляется только в момент заряда или при присоединении к АБ разъема X1, если такой алгоритм предусмотрен для СБ разработчиками, то есть балансирование осуществляется вне зависимости, идет ток заряда или нет.

Неуправляемая внешняя СБ ни при каких обстоятельствах не должна иметь возможности перезарядить любой из аккумуляторов выше установленного уровня (4,15–4,3 В) при нивелировании, иначе необходимо будет ввести еще один провод управления от внутреннего контроллера АБ на отключение СБ или предусмотреть специальную команду по интерфейсу. Введение дополнительного проводника или команд еще более усложняет систему, и внешняя неуправляемая СБ постепенно превратится в управляемую внешнюю СБ. Каким образом СБ может осуществить перезаряд отдельного аккумулятора, станет ясно после рассмотрения способов балансирования.

По способу балансирования СБ можно разделить на:

- пассивные;
- активные.

**Пассивные СБ.** Пассивные СБ отличаются тем, что часть энергии аккумулятора с большим напряжением они рассеивают в виде тепла в окружающее пространство. При заряде, отбирая часть энергии (тока), такая СБ уменьшает ток заряда нивелируемого аккумулято-

ра, уменьшая скорость заряда до тех пор, пока не зарядятся все остальные.

Такую СБ можно построить с помощью уже упоминавшегося резистора необходимой мощности и управляемого ключа (твердотельного реле, например, PVG612). Получится пассивная управляемая СБ (рис. 4). Нивелирование можно осуществлять практически на протяжении всего времени заряда.

Другой способ построения пассивной СБ — с помощью стабилитрона. Мощный стабилитрон можно собрать на основе микросхемы TL431 и транзистора с мощным резистором, на которых и будет рассеиваться выделяемое тепло. Это пассивная автономная СБ. Когда напряжение на аккумуляторе достигнет определенного уровня (например, 4,1 В), через транзистор потечет некоторый ток, уменьшая ток заряда аккумулятора. Остальные аккумуляторы будут заряжаться прежним током и «догонят» через некоторое время этот аккумулятор. Необходимо отметить, что нивелирование здесь будет происходить только в конце заряда, когда аккумуляторы приблизятся к порогу срабатывания стабилитронов. Время заряда при такой СБ увеличится, за счет того, что токи через аккумуляторы будут уменьшаться по мере их заряда. Тем не менее, такую систему баланса применяют из-за ее простоты.

Каждый из приведенных вариантов пассивной СБ можно разместить как в составе АБ, так и вне его. Когда применяют пассивный способ балансирования и СБ находится в составе АБ, обычно токи нивелирования невелики по понятным причинам: происходит рассеивание тепла внутри корпуса АБ. При использовании СБ вне АБ необходимо учитывать падение напряжения на контактных соединителях, проводах и т. д.

К достоинствам пассивных СБ можно отнести простоту реализации, к недостаткам — рассеивание энергии в виде тепла (использование радиаторов, вентиляторов и т. д. для отвода тепла), что приходится учитывать, чтобы не перегреть сами аккумуляторы. Особенно, если АБ должна работать при температурах окружающей среды до +50 °С и СБ находится внутри корпуса АБ или в непосредственной близости от аккумуляторов.

**Активные СБ.** Активные СБ отличаются тем, что они перераспределяют энергию от аккумуляторов с наибольшими напряжениями к аккумуляторам с наименьшими напряжениями. Такое перераспределение можно осуществить разными способами.

Например, их можно построить следующим образом (рис. 6):

- От аккумулятора с наибольшим напряжением энергия отдается всей цепочке аккумуляторов в составе АБ.
- Энергия от всей цепочки аккумуляторов передается аккумулятору с наименьшим напряжением.

На рис. 6 изображена ситуация, когда АБ работает на нагрузку (для наглядности не изображены другие три преобразователя энергии). В первом случае ток I3 станет меньше тока нагрузки I4, а значит, аккумуляторы G2–G4 будут разряжаться медленнее (G1 здесь имеет самое высокое напряжение из всех четырех), во втором больше, аккумуляторы G2–G4 будут разряжаться быстрее (G1 здесь имеет самое низкое напряжение из всех четырех). В качестве преобразователей энергии используют DC/DC-преобразователи.

Второй способ, по мнению автора, предпочтительнее по следующим причинам. Во-первых, если использовать управляемую активную СБ, при разряде АБ, состоящей из 8 последовательно включенных аккумуляторов, «проваливаются» по напряжению чаще всего не более одного-двух по истечении некоторого времени эксплуатации АБ (деградация аккумулятора). Можно снизить нагрузку на эти аккумуляторы, пуская в них ток, берущийся из всей цепочки. При этом мы задействуем всего 1–2 преобразователя (при первом способе их было бы 6–7, так как пришлось бы брать энергию от аккумуляторов с нормальными напряжениями и отдавать эту энергию в нагрузку). Необходимо учитывать, что каждый преобразователь имеет свой КПД. Построить СБ по второму способу перераспределения значительно легче: можно использовать один преобразователь и ключи (на рис. 6 показаны пунктиром), подключающие его к нужному аккумулятору. Так как «проваливается» всего 1–2 аккумулятора, одного преобразователя при втором способе перераспределения энергии может оказаться достаточно (его можно подключать попеременно то к одному, то к другому «провалившемуся» аккумулятору), чего не скажешь о первом способе перераспределения, где необходимо будет задействовать несколько преобразователей. Таким образом, СБ может не только балансировать, но и «продлевать» разряд АБ, и ее емкость будет падать не так значительно при некоторой деградации 1–2 аккумуляторов. «Продлевать» разряд — в смысле уменьшать

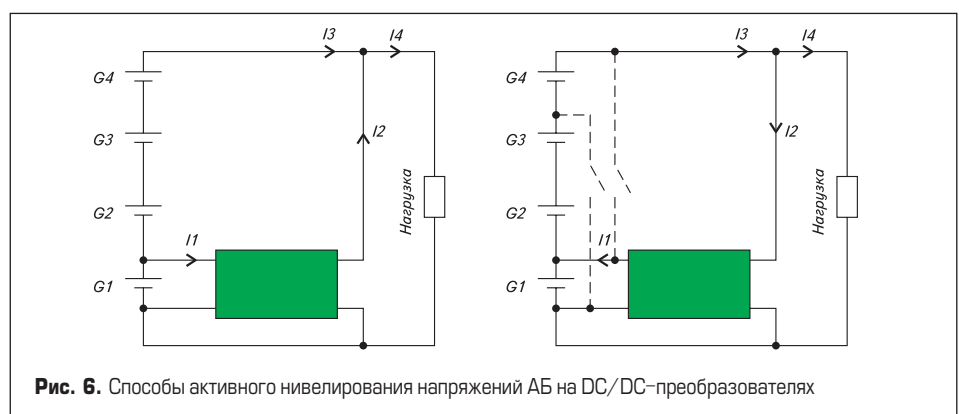


Рис. 6. Способы активного нивелирования напряжений АБ на DC/DC-преобразователях

нагрузку (если ток разряда больше тока, отдаваемого от преобразователя в аккумулятор) на единичный аккумулятор, который, в свою очередь, будет медленнее разряжаться и достигнет конечного разрядного напряжения за более длительное время (при постоянной нагрузке), чем без преобразователя.

Во-вторых, при заряде токи, отдаваемые от преобразователей всей цепочке аккумуляторов (при первом способе), будут суммироваться с зарядным током, что необходимо учитывать, так как общий ток заряда возрастет.

В-третьих, СБ, построенную по второму способу, легче реализовать аппаратно (рис. 7). Здесь показан DC/DC-преобразователь, сделанный для двух аккумуляторов. Вторичные обмотки намотаны на один сердечник (число обмоток может достигать до десятка). Энергия перераспределяется в сердечнике, и самый разряженный аккумулятор в цепочке будет получать больше энергии, чем самый заряженный.

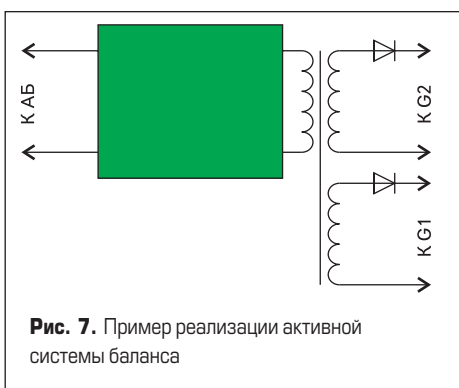


Рис. 7. Пример реализации активной системы баланса

К достоинствам активных СБ можно отнести: высокий КПД, не рассеивание значительного количества тепла (особенно при емкостях АБ 50–300 А·ч и более и токах балансировки 3–7 А), как при пассивных СБ, продление срока службы АБ.

К достоинствам следует отнести и тот факт, что активная СБ может быть использована в качестве устройства подзаряда, что особенно важно для бесперебойных источников питания на основе Li-ion аккумуляторов. В таком случае СБ можно питать от сети 220 В, а не от АБ, и она может попеременно (или сразу, в за-

висимости от исполнения) по командам МКУ или самостоятельно (автономная СБ) подзаряжать как отдельные аккумуляторы, так и все вместе, выполняя и совмещая функцию системы баланса (СБ) и зарядного устройства (ЗУ).

К недостаткам нужно отнести относительную сложность и дороговизну исполнения такой СБ, значительное увеличение уровня шума и помех при работе DC/DC-преобразователя. Увеличение помех требует более сложной системы измерения напряжений на аккумуляторах, экранирования, фильтрации, продуманности расположения балансира и МКУ и т. д., что также ведет к некоторому удорожанию всей системы обеспечения батареи.

Другой способ реализации показан на рис. 8.

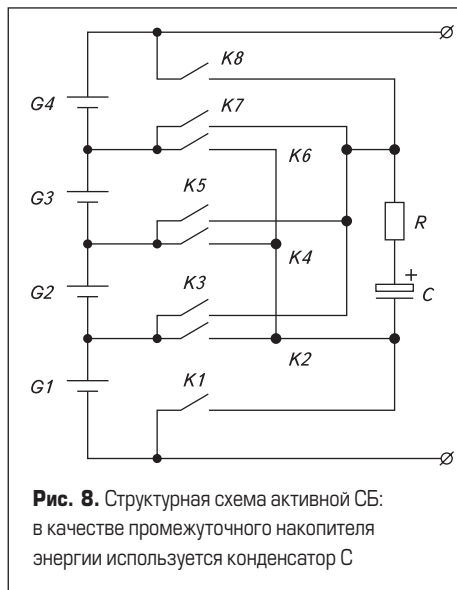


Рис. 8. Структурная схема активной СБ: в качестве промежуточного накопителя энергии используется конденсатор С

Конденсатор С заряжается от цепочки наиболее заряженных аккумуляторов (например, от G1–G3), через ключи K7, K1, а разряжается на один аккумулятор G4, ключи K6, K8. При заряде конденсатор может заряжаться от напряжения всей АБ, через ключи K1, K8. Резистор ограничивает бросок тока при заряде или разряде конденсатора, чтобы не перегружать ключи K1–K8. Такая система баланса была выполнена автором на основе MSP430F1232, этот микроконтроллер обладает широкими воз-

можностями по управлению своим внутренним энергопотреблением. MSP430F1232 имеет на своем борту АЦП и позволяет измерять напряжение на аккумуляторах через резистивные делители (на схеме не показаны). Балансир управляется извне МКУ, но может и самостоятельно принимать решения при определенном разбалансе напряжений, в определенном диапазоне напряжений на аккумуляторах, и осуществлять балансировку. МКУ имеет возможность принудительно отключить балансир. В результате получается управляемо-автономный балансир.

Стоит упомянуть о еще одном способе балансировки и отнести его к активному. Дело в том, что некоторые проектировщики АБ вообще не используют СБ, а заряжают каждый аккумулятор своим зарядным устройством. Схема такого способа выглядит так же, как и на рис. 5, только вместо СБ и одного ЗУ присутствуют 4 ЗУ (обычно в одном корпусе и имеют единую систему индикации конца заряда). В конце заряда все аккумуляторы будут иметь одинаковое напряжение. Такой способ применяют, когда АБ состоит из 2–3 последовательно соединенных аккумуляторов средней емкости (10–30 А·ч). При этом цена на все ЗУ не так сильно возрастает, но зато не нужно вообще «связываться» с СБ.

Существуют также комбинированные СБ — активно-пассивные. Часть аккумуляторов (например, цепочка из четырех последовательно соединенных) балансируются активным способом, а внутри цепочки каждый аккумулятор — пассивным. Такой метод можно применять для относительно высоковольтных батарей, состоящих из нескольких десятков последовательно соединенных аккумуляторов, причем активная и пассивная части могут находиться как в составе, так и вне АБ.

В заключение отметим, что для АБ небольшой емкости выпускаются специализированные микросхемы для литиевых батарей, которые обычно имеют встроенную пассивную систему баланса. Для АБ большой емкости необходимо проектировать СБ самостоятельно. Без СБ АБ начнет постепенно терять емкость из-за «разбега» напряжений.