

# Активные и пассивные системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей

Алексей РЫКОВАНОВ  
rycovanalex@yandex.ru  
Сергей БЕЛЯЕВ  
belss751@rambler.ru

**Для эксплуатации Li-ion батарей необходимо применять балансировочные устройства, сводящие разбаланс напряжений между ячейками батареи к минимуму. В общем случае системы баланса можно разделить на активные и пассивные. О преимуществах и недостатках систем каждого из этих типов рассказано в этой статье.**

## Введение

Как известно, при работе с Li-ion аккумуляторами следует соблюдать определенные режимы их эксплуатации. В частности, производитель аккумулятора четко регламентирует граничные значения напряжений заряда и разряда. Таким образом, при формировании Li-ion аккумуляторных батарей (АБ) из последовательно соединенных ячеек возникает необходимость нивелирования разброса напряжений между ячейками. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, при разряде батареи по достижении хотя бы одной из ячеек граничного напряжения разряда необходимо отключить всю АБ от нагрузки, так как дальнейший ее разряд повлечет нарушение требований режима эксплуатации для этой ячейки. Однако при наличии существенного разброса по напряжению между ячейками АБ в недозаряженных ячейках все еще остается некоторый запас энергии, использовать который, очевидно, не представляется возможным. С другой стороны, при заряде возникает обратная ситуация. По достижении хотя бы одной из ячеек граничного напряжения заряда необходимо отключить АБ от зарядного устройства с целью предотвращения выхода этой ячейки за границы требований режима эксплуатации. В данном случае, при наличии существенного разброса по напряжению между ячейками АБ, некоторые из ячеек оказываются существенно недозаряженными. Таким образом, оказывается невозможным использовать всю потенциальную емкость АБ.

Возникновение разброса по напряжению между ячейками АБ в процессе ее эксплуатации может являться следствием соответствующе-

го разброса значений емкости ячеек, а также различной скорости их саморазряда. Причиной возникновения разброса значений этих параметров являются индивидуальные особенности аккумуляторов, входящих в ее состав. При изготовлении АБ, конечно же, осуществляется подбор аккумуляторов с очень близкими (до 1–3%) значениями емкости и прочих характеристик, однако практически невозможно предугадать, как будут меняться характеристики аккумулятора в процессе его старения и выработки ресурса. Кроме того, эксплуатация АБ в критических режимах или близких к таковым негативно скажется на характеристиках аккумуляторов, но степень влияния такого рода фактора для разных экземпляров аккумуляторов будет различной.

Все сказанное выше предопределяет неизбежность столкновения разработчиков АБ с проблемой разброса значений напряжения ее ячеек, или, как часто говорят, с проблемой разбаланса АБ. Причем эта проблема встает тем острее, чем больше последовательно соединенных ячеек в АБ. Для решения этой проблемы применяют системы баланса АБ, основной задачей которых является сведение к минимуму разброса по напряжению между ячейками. Таким образом, при разряде или заряде все ячейки АБ достигают установленных пределов почти одновременно, что позволяет в полной мере использовать потенциал батареи.

Системы баланса (СБ) как таковые можно классифицировать по нескольким признакам: различают управляемые и неуправляемые СБ, входящие в состав АБ и внешние. Однако прежде всего СБ подразделяют на два типа — активные и пассивные. Конечно же, существуют разные способы реализации СБ каждого из этих типов. Например, активные СБ могут быть трансформаторными или емкостными [1].

В настоящее время производители реализуют различные подходы к построению СБ. Выбор в каждом конкретном случае определяется требованиями (техническими, эксплуатационными, экономическими и др.), предъявляемыми к АБ в целом, а также особенностями ее построения. Далее мы рассмотрим основные принципы работы активных и пассивных СБ и выделим основные факторы, которые должны быть приняты во внимание при выборе того или иного подхода к построению СБ.

Итак, любая СБ должна осуществлять балансировку АБ, то есть стремиться уменьшить (а в идеальном случае — свести к нулю) разброс значений напряжений на аккумуляторах, входящих в состав АБ. Работа СБ позволяет избегать описанных выше проблем, связанных с разбалансом, что положительно сказывается на величине отдаваемой емкости АБ, а также, в долгосрочной перспективе, увеличивает ее ресурс.

Перед тем как перейти к принципам работы СБ различных типов, рассмотрим процессы, протекающие в АБ. На рис. 1 показана зависимость напряжения на аккумуляторе от степени его заряженности. На графике приведены кривые, полученные при заряде током 0,5Сн аккумулятора с положительным электродом на основе кобальтата

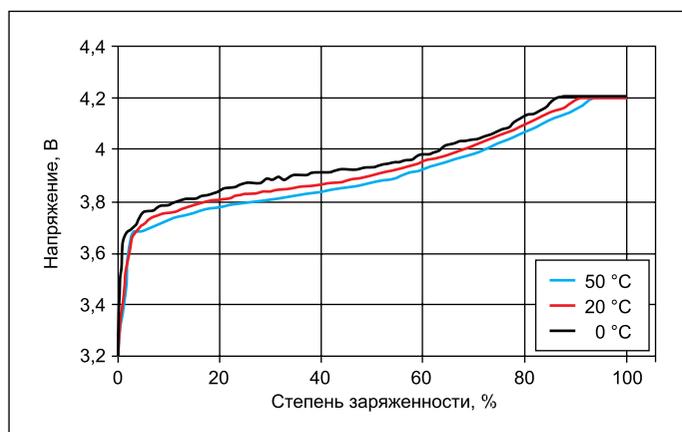


Рис. 1. Зависимость напряжения на аккумуляторе от степени заряженности при заряде током 0,5Сн

лития при различных значениях температуры, и именно такой аккумулятор мы будем рассматривать в качестве наглядного примера. (Аккумуляторы с другими материалами имеют другие значения зависимости, где необходимо применять иные алгоритмы балансировки, но суть изложенного остается той же.)

Считается, что аккумулятор, изготовленный из определенных материалов (электролит, электродные массы), при определенной степени заряженности имеет вполне определенное значение напряжения с небольшой поправкой на температуру. Причем это значение не зависит от значения емкости аккумулятора, будь то аккумулятор от мобильного телефона емкостью в 1 А·ч, высокоемкий аккумулятор от мобильного телефона емкостью в 100 А·ч или тот же высокоемкий аккумулятор, деградировавший в процессе эксплуатации и имеющий емкость 93 А·ч.

Хотя, как уже говорилось выше, при производстве АБ применяются строгие методики отбора аккумуляторов для минимизации разброса по параметрам между аккумуляторами в рамках одной АБ, со временем, в силу различных факторов, все-таки возникает некоторый разброс по емкости. Ясно, что в начале эксплуатации АБ этот разброс будет несущественным. В идеальном случае (при одинаковом старении аккумуляторов) он может оставаться несущественным продолжительное время, однако так бывает не всегда.

В качестве примера рассмотрим случай существенного разброса значений емкости. Представим, что АБ состоит из двух последовательно соединенных аккумуляторов емкостью 50 и 100 А·ч (значения взяты для наглядности, вообще АБ с таким разбросом вполне можно считать вышедшей из строя), и эти аккумуляторы изготовлены из идентичных материалов. Допустим, что они заряжены до одинакового напряжения (рис. 2а). В таком случае, хотя напряжения и одинаковые, очевидной является разность в запасенной энергии, имеющаяся между аккумуляторами.

Если начать заряжать такую батарею, то ток заряда, текущий через каждый аккумулятор, будет одинаковым. Таким образом, по истечении некоторого времени заряда оба аккумулятора запасут одинаковое количество энергии, однако степень заряженности и, как следствие, напряжение на них изменится по-разному (рис. 2б). Очевидно, что напряжение на аккумуляторе емкостью 50 А·ч будет возрастать быстрее, чем на аккумуляторе емкостью 100 А·ч, и он первым достигнет конечного зарядного напряжения.

Рассмотрим, каким образом будет производиться балансировка АБ, взятой нами в качестве примера, системами различных типов.

### Пассивная СБ

Пассивная СБ будет пытаться уменьшить ток заряда того аккумулятора, напряжение на котором возрастает быстрее. В общем случае это можно представить как замыкание такого аккумулятора шунтирующим резистором  $R$ . Таким образом, через этот аккумулятор будет протекать лишь часть зарядного тока. Оставшаяся же часть тока потечет через шунт  $R$  (рис. 3).

Аккумулятор  $G_1$  имеет емкость 50 А·ч,  $G_2$  — 100 А·ч. При снижении тока заряда на величину  $I_R$  скорость заряда аккумулятора  $G_1$  уменьшится, следовательно, уменьшится и скорость возрастания напряжения на нем. Таким образом, при достижении конечного зарядного напряжения на аккумуляторе  $G_1$  аккумулятор  $G_2$ , через который все это время протекал полный ток заряда, запасет несколько большее количество энергии, чем при отсутствии системы баланса. Величина этой добавки определяется разностью токов заряда аккумуляторов, умноженной на время заряда, и без фазы падающего тока составит  $I_R \times t$  [2]. Во время разряда батареи пассивная СБ, как правило, никаких действий не производит. Разряд в штатном режиме будет остановлен, когда напряжение на одном из аккумуляторов (в данном случае на аккумуляторе  $G_1$ ) достигнет минимального допустимого значения.

При следующем цикле заряда ситуация несколько изменится, так как в аккумуляторе  $G_2$  останется некоторое количество энергии и, следовательно, напряжение на нем будет выше, чем на аккумуляторе  $G_1$ . Поэтому в начале заряда СБ будет шунтировать резистором

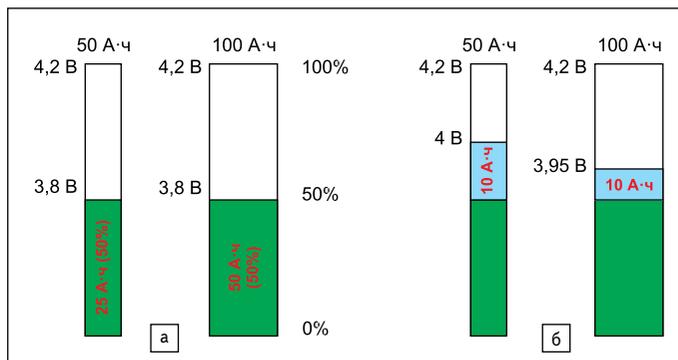


Рис. 2. Разность емкостей аккумуляторов при одном и том же напряжении

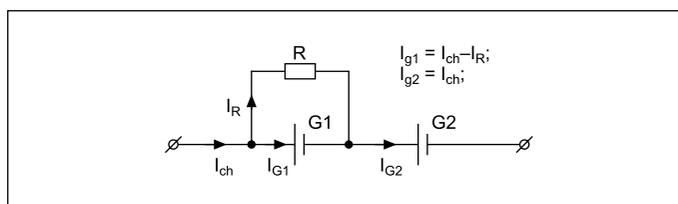


Рис. 3. Шунтирование аккумулятора резистором  $R$  при заряде

аккумулятор  $G_2$ . Затем, когда напряжение на  $G_1$  превысит напряжение на  $G_2$ , шунтироваться будет уже аккумулятор  $G_1$ . Естественно, шунтирование аккумулятора  $G_2$  в начале заряда выглядит неэффективным, так как получается, что СБ в этот момент работает против себя. На самом деле больших проблем из-за этого не возникает.

Во-первых, в хорошо подобранной батарее разброс по емкости между аккумуляторами несравнимо меньше, чем в рассматриваемом примере, даже после длительной эксплуатации, вследствие чего шунтирование «не того» аккумулятора будет кратковременным. Во-вторых, глядя на рис. 1, можно заметить, что на графике есть пологий участок (5–60%), и при не очень большом разбросе емкостей разница напряжений между аккумуляторами на этом участке может быть сравнима с погрешностью измерения СБ. Следовательно, в этот период никакого шунтирования производиться не будет.

В итоге при правильно работающей пассивной СБ возникает ситуация, когда в конце заряда АБ все аккумуляторы в ней оказываются полностью заряженными, а в конце разряда в аккумуляторах с несколько большей емкостью остается некоторое количество энергии, которое в данном случае не используется. Таким образом, общая емкость АБ из последовательно соединенных аккумуляторов оказывается не больше, чем у аккумулятора с минимальной емкостью.

Обобщая сказанное, можно выделить несколько основных недостатков пассивных СБ. В первую очередь, это невозможность использования всей энергии, которую может запастись батарея. Кроме того, при прохождении тока через шунтирующие резисторы на них происходит рассеивание энергии в виде тепла, что снижает КПД системы «АБ — зарядное устройство». При использовании АБ средней емкости (десятки А·ч), не говоря уже о высокоемких, количество выделяемого тепла будет велико, и разработчикам придется предусмотреть систему теплоотвода, что в некоторых приложениях бывает весьма непросто. Также при использовании пассивной СБ иногда прибегают к преднамеренному увеличению времени заряда путем ограничения зарядного тока. При большом разбалансе это способствует более эффективной работе СБ благодаря увеличению соотношения  $I_R/I_{ch}$ , однако увеличение времени заряда приводит к снижению эксплуатационных характеристик батареи.

В каких же случаях стоит применять пассивные СБ? Это необходимо делать тогда, когда необходимо скомпенсировать ток саморазряда одинаковых или очень близких по емкости аккумуляторов. Даже одинаковые аккумуляторы одного и того же производителя могут

иметь разные токи саморазряда. При хранении АБ разность токов саморазряда приведет к тому, что в разных аккумуляторах останется разное количество энергии, даже при одинаковой емкости последних. Достоинством пассивных СБ является их низкая стоимость, а также компактность и простота. Важно и то, что пассивные СБ мало влияют на удельные характеристики всей АБ (Вт·ч/кг), однако их применение накладывает дополнительные требования по подбору аккумуляторов перед комплектованием и сборкой батареи.

Другими словами, при использовании пассивной СБ все аккумуляторы в АБ должны иметь приблизительно одинаковые емкости и один и тот же химический состав, то есть быть от одного производителя. И даже желательно, чтобы они были выбраны из одной поставочной партии. Такой подход налагает требования к качеству материалов и технологии производства, а значит, непосредственно к качеству аккумулятора. Это будет являться некоторой гарантией одинакового старения (деградации электродных масс, то есть потери емкости с течением времени) всех аккумуляторов в АБ.

### Активные СБ

Активные СБ способны перераспределять энергию внутри АБ и могут работать как при разряде, так и при заряде. На рис. 4 схематически показан принцип такого перераспределения при разряде.

Перераспределение энергии происходит от аккумулятора  $G_2$ , имеющего большую емкость, к аккумулятору  $G_1$ , имеющему меньшую емкость. Активная СБ берет часть энергии у  $G_2$ , увеличивая его ток разряда ( $I_{G2}$ ), и уменьшает ток разряда  $G_1$  ( $I_{G1}$ ). В идеальном случае, если принять КПД активной СБ за 100%, а напряжения на аккумуляторах примерно равными, то входной и выходной ток СБ будут равны ( $I_{Bout} = I_{Bin}$ ). При заряде ситуация изменится на противоположную, и активная СБ будет уменьшать ток заряда аккумулятора  $G_1$  и увеличивать ток заряда  $G_2$ , становясь для  $G_1$  своего рода шунтом, показанным на рис. 3, но не преобразующим энергию в тепло, а передающим ее аккумулятору  $G_2$ .

Проведем оценочный расчет (без учета КПД СБ): какие же токи балансировки необходимо иметь, чтобы сбалансировать приведенную в качестве примера батарею в различных режимах разряда. Учтем при этом время разряда, что часто необходимо потребителю для расчета работы АБ.

При одночасовом разряде максимальный ток АБ в нагрузку составит 75 А, ток баланса — 25 А; при 2-часовом режиме ток разряда — 37,5 А, ток баланса — 12,5 А; при 4-часовом режиме ток разряда — 18,75 А, ток баланса — 6,25 А; при 8-часовом режиме ток разряда — 9,375 А, ток баланса — 3,125 А. По расчетам видно, что при 4-...8-часовом режиме разряда даже на АБ с очень большим разбросом по емкости, взятой нами в качестве примера, балансировочные токи остаются небольшими. Но и такие токи перераспределения энергии внутри АБ способны повысить отдаваемую в нагрузку емкость, которая во всех режимах разряда составит 75 А·ч. Эта емкость, естественно, больше, чем при использовании пассивной СБ, так как появляется возможность отдать в нагрузку всю энергию, запасенную в АБ.

Таким образом, даже при значительном падении емкости одной из ячеек внутри АБ (в нашем примере — в два раза) емкость АБ состоящая из двух последовательно соединенных аккумуляторов, упала всего на 25%. Чем больше последовательно соединенных аккумуляторных ячеек в АБ, тем меньшее влияние оказывает снижение емкости (деградация) одной ячейки на емкость всей АБ при использовании активных СБ.

Чем больше ток, который может выдать СБ, и меньше ток нагрузки, тем больший разбаланс емкостей может свести активная СБ. Понятно, что до бесконечности увеличивать балансировочные токи нельзя, иначе АБ превратится в DC/DC-преобразователь и значительно ухудшатся ее удельные характеристики.

Значительным преимуществом активных СБ является намного меньшее выделение тепла при работе по сравнению с пассивными. Поэтому там, где необходим балансировочный ток более 5 А, приме-

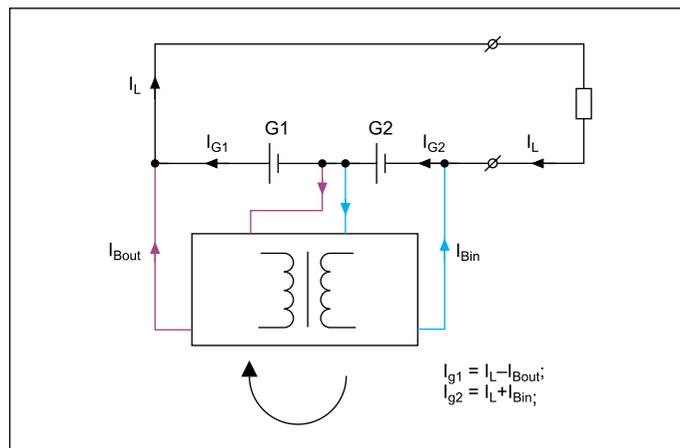


Рис. 4. Принцип действия активной СБ

няют активные СБ. Благодаря современным достижениям в области создания DC/DC-преобразователей можно изготавливать компактные и высокоэффективные активные СБ со значительным балансировочным током (десятки ампер) при КПД >0,85. Способность активных СБ работать и при разряде освобождает от необходимости растягивать время заряда, для того чтобы сбалансировать АБ, как это делается при использовании пассивных СБ. Потребитель всегда нуждается в АБ, которую можно заряжать как можно быстрее, а затем использовать АБ как можно дольше, получив при этом хорошие удельные характеристики.

К недостаткам активных СБ следует отнести дороговизну по сравнению с пассивными СБ, затраты времени и средств на проектирование и изготовление. А также то, что в подключенном к АБ состоянии активные СБ имеют заметное потребление тока на холостом ходу, поэтому их часто проектируют как управляемые, то есть СБ включают в необходимые моменты времени. Управление должно осуществляться от системы обеспечения функционирования (СОФ, battery management system, BMS), что предполагает наличие алгоритма в самой СОФ для управления СБ.

В настоящее время производители электронных компонентов выпускают широкий спектр решений для реализации различных подходов к построению активных систем баланса Li-ion АБ. Как правило, такие решения представляют собой отдельную интегральную микросхему, для работы которой необходимо несколько внешних элементов (трансформаторы/катушки индуктивности, MOSFET-транзисторы). Функционал управления активным балансированием батареи также может быть интегрирован непосредственно в микросхему контроля. Таким образом, разработчик АБ имеет возможность построить активную систему баланса с учетом всех требований, определяемых назначением и структурой батареи, в том числе ее емкостью, номинальным напряжением, режимами работы и, что немаловажно, стоимостью.

В качестве примера современного решения для реализации активной системы баланса рассмотрим микросхему LTC3300-1 фирмы Linear Technology (рис. 5). Одна такая микросхема способна перераспределять энергию в батарее, содержащей до шести последовательно соединенных Li-ion аккумуляторов. При этом имеется возможность построения системы баланса для высоковольтных батарей (с напряжением до 1000 В) на основе необходимого количества микросхем LTC3300-1, каждая из которых будет обслуживать свою группу аккумуляторов. Применение этой микросхемы возможно как в тандеме с микросхемой контроля Li-ion батареи LTC6803-1 того же производителя, так и с другими устройствами контроля, в том числе и спроектированными самим разработчиком батареи. Это обусловлено наличием цифрового интерфейса управления, аппаратно совместимого с SPI, и простого протокола обмена управляющей и мониторинговой информацией.

Благодаря возможности использования внешних компонентов с различными характеристиками можно соответствующим образом варь-

ровать характеристики разрабатываемой системы баланса. В частности, применив мощные MOSFET-транзисторы, можно повысить ток баланса до 10 А. Конечно, можно обратить внимание и на малогабаритные или более дешевые внешние компоненты, если для конечного изделия критичны такие параметры, как размеры, тепловыделение или цена.

Отметим, что при разработке микросхемы LTC3300-1 особое внимание уделялось защите от сбоев и нештатных ситуаций. В частности, если микросхема обнаружит нарушение целостности связанных с ней электрических цепей, перенапряжение на каком-либо из аккумуляторов или другую нештатную ситуацию, она незамедлительно прекратит цикл балансирования, если таковой был запущен, во избежание повреждения составных частей батареи. В протоколе информационного обмена также предусмотрена защита от сбоев при передаче путем введения контрольной суммы (CRC) в пакет данных. Поведение микросхемы при обнаружении ошибки в принятых данных четко регламентировано документацией и, следовательно, заранее известно разработчику, что позволяет не терять контроль за поведением системы баланса при отработке нештатных ситуаций такого рода.

Говоря об области применения активных СБ, во-первых, следует упомянуть АБ большой емкости, где даже токи, компенсирующие саморазряд (при ограниченном времени заряда), могут достигать десятков ампер, что неприемлемо много для пассивных СБ. При этом аккумуляторы большой емкости имеют относительно высокую стоимость, и стоимость активной СБ на их фоне незначительна. Во-вторых, активные СБ предпочтительнее, если требуется увеличение надежности АБ и продление ее срока службы, так как даже имея высокочастотные методики подбора аккумуляторов в АБ и качественные аккумуляторы, не всегда можно предсказать скорость деградации отдельных ячеек в АБ. В конце срока эксплуатации АБ степень де-

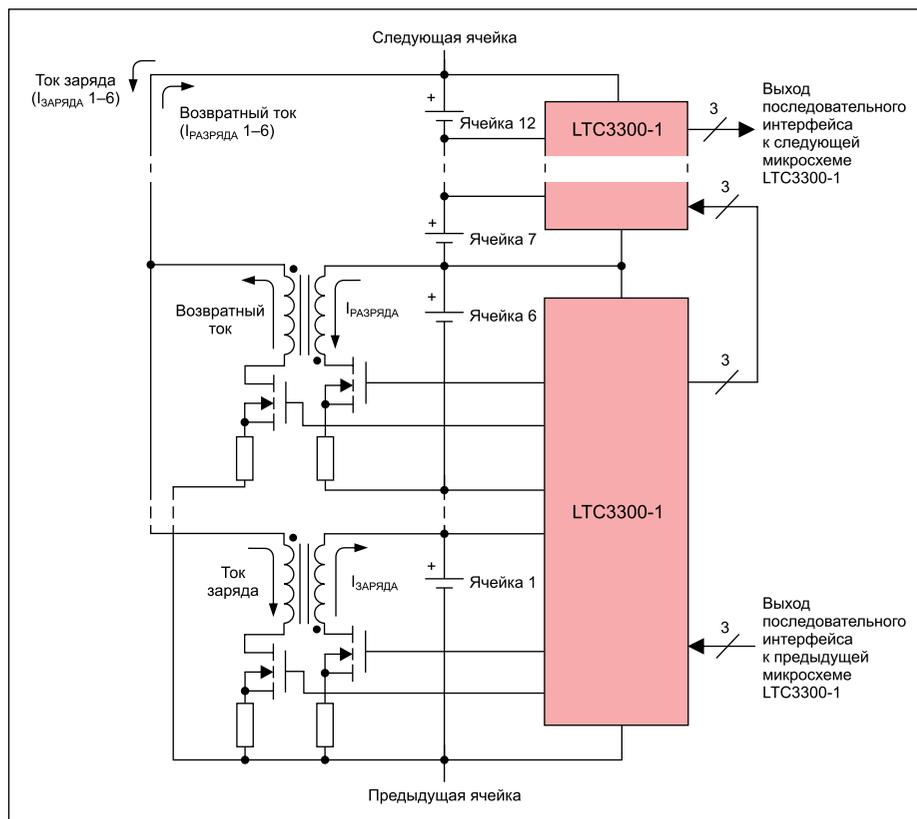


Рис. 5. Схема включения микросхемы LTC3300-1

градации отдельных аккумуляторов может быть различной, что можно компенсировать активной СБ.

### Заключение

Еще раз подчеркнем, что системы баланса АБ могут быть реализованы различными способами. И активные, и пассивные СБ имеют право на существование как различные способы решения поставленной задачи при учете их достоинств и недостатков. Использование того или иного типа СБ

в каждом конкретном случае диктуется особенностями самой АБ, предполагаемой сферой ее применения и, конечно же, комплексом предъявляемых к ней требований. ■

### Литература

1. Рыкованов А. С. Системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая электроника. 2009. № 1.
2. Рыкованов А. С., Румянцев А. М. Способы заряда Li-ion аккумуляторов и батарей на их основе // Компоненты и технологии. 2012. № 11.