

Построение высоковольтных Li-ion аккумуляторных батарей

Современные Li-ion аккумуляторы способны работать в составе высоковольтных аккумуляторных батарей, обеспечивая создание автономных энергоустановок большой мощности. В статье рассматриваются принципы построения высоковольтных Li-ion батарей.

Алексей Рыкованов

rycovanalex@yandex.ru

Василий Жданов, к. х. н.

v_zhdanov@list.ru

Использование достижений современных технологий в производстве Li-ion аккумуляторов открывает большие перспективы для их использования в автономных силовых энергоустановках.

Для удобства сравнения характеристик аккумуляторов разной емкости разрядный ток аккумуляторов представляют не в абсолютных единицах (амперах), а в относительных — долях от емкости аккумулятора. Производители аккумуляторов выпускают обычно несколько типоразмеров аккумуляторов, однако они не всегда подходят для решения конкретной задачи. Преимуществом Li-ion аккумуляторов является то, что аккумуляторы одного и того же типа можно соединять параллельно для кратного увеличения емкости аккумуляторной батареи (АБ). Также для лучшей заполняемости посадочного места при проектировании АБ можно использовать аккумуляторы меньшей емкости, соединяя их по параллельно-последовательной схеме.

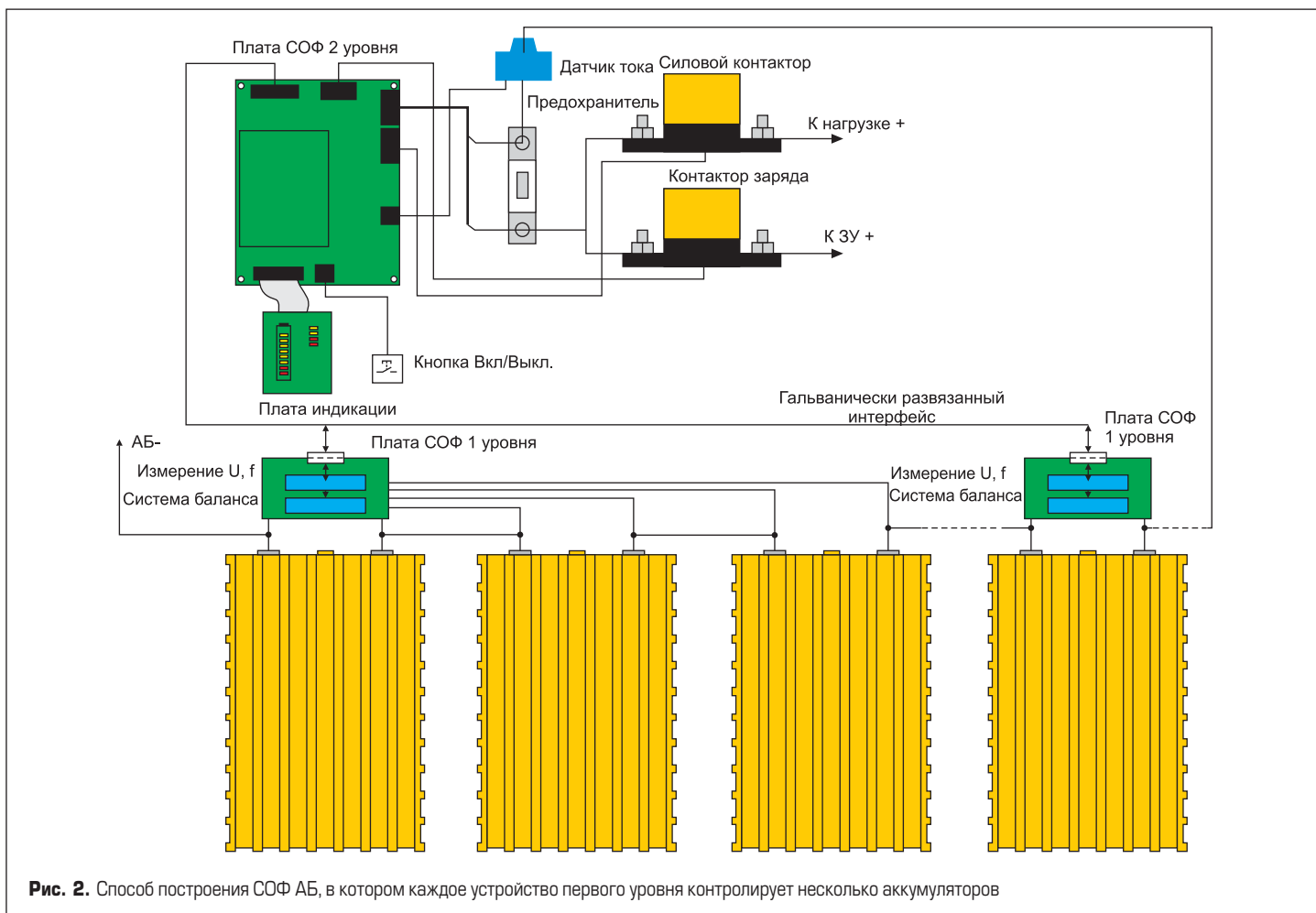
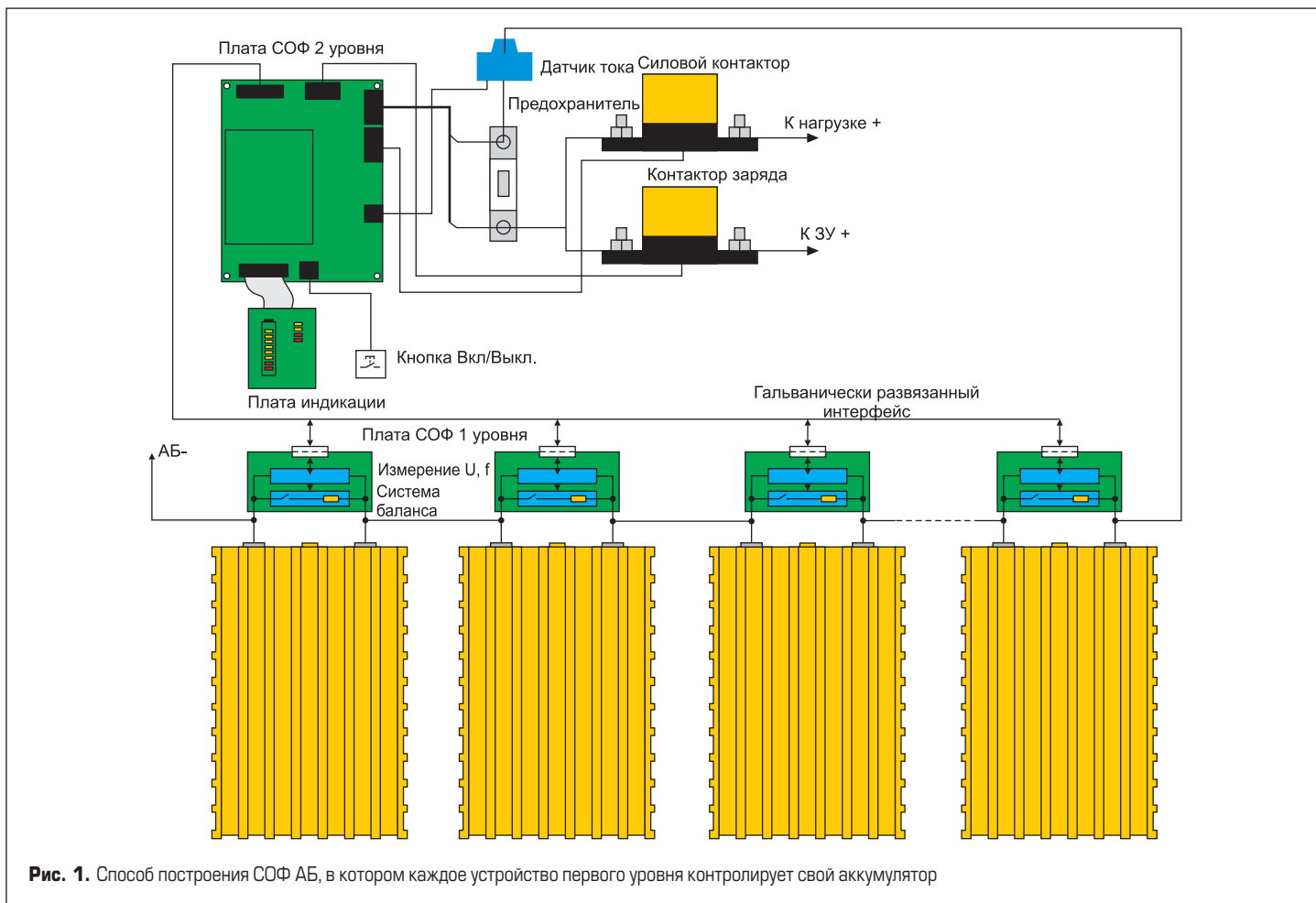
Для увеличения энергоемкости АБ при сохранении величины рабочего тока выгодно увеличивать напряжение АБ, а не ее электрическую емкость. При этом в отведенном объеме АБ делают более высоковольтной, с меньшей емкостью, а не более емкой с меньшим напряжением. Параллельно соединенные аккумуляторы можно рассматривать, в первом приближении, как одиночный аккумулятор, емкость которого равна сумме емкостей параллельно соединенных аккумуляторов. Обязательной частью Li-ion АБ, обеспечивающей ее безопасность и срок службы, является система обеспечения функционирования (СОФ), функции которой заключаются в отслеживании параметров аккумуляторов и всей АБ и недопущении их выхода за определенные пределы по напряжению и температуре. В состав СОФ входит также система баланса, сводящая к минимуму разбег по емкости аккумуляторов АБ, соединенных последовательно. Перед сборкой в АБ аккумуляторы подбирают по емкости, однако вследствие разных токов саморазряда остаточная емкость в каждом аккумуляторе в составе АБ может быть различной. Нивелирование емкостей аккумуляторов обеспечивает система баланса. СОФ контролирует такие

основные параметры, как напряжение на каждом аккумуляторе, температура, разрядный и зарядный ток всей АБ.

Высоковольтные АБ на базе Li-ion аккумуляторов используются для работы в качестве высокомоощных источников тока в различных транспортных средствах (гибридные электромобили, автономные подводные аппараты, стартерные батареи и др.), а также в качестве буферных накопителей электрической энергии в возобновляемой энергетике, в системах аварийного и гарантированного электроснабжения.

СОФ высоковольтной АБ обычно проектируют двумя основными способами. Первый из них (рис. 1) достаточно универсален и включает комплект устройств контроля первого и второго уровня. Каждое устройство первого уровня размещено на отдельной плате и контролирует напряжение и температуру своего аккумулятора, а также содержит блок баланса. Полученные данные устройства первого уровня передают в вышестоящее устройство — второго уровня. Это устройство контролирует общий ток АБ, управляет работой коммутаторов (зарядного и разрядного), контролирует целостность предохранителя, выводит данные на дисплей, передает данные на устройства первого уровня о включении баланса на том или ином аккумуляторе и т. д. Построение системы баланса рассмотрено в [1]. Для простоты мы будем считать, что система баланса пассивная, управляемая, состоит из ключа и резистора. При замыкании ключа во время заряда ток заряда аккумулятора уменьшается на величину тока, протекающего через резистор. Некоторая универсальность такого способа построения СОФ заключается в том, что если возникает необходимость добавить один или два последовательно соединенных аккумулятора, то сделать это просто, добавив в схему всего одно-два дополнительных устройства первого уровня.

Второй способ построения СОФ заключается в том, что одно устройство первого уровня контролирует несколько аккумуляторов (рис. 2). Такое устройство размещается на отдельной плате, а все остальное остается так же, как и в описанном выше



варианте. Достоинства и недостатки двух основных способов построения СОФ высоковольтных АБ рассмотрены в [2]. Отметим только, что при таком построении СОФ добавление одного аккумулятора в последовательной цепочке может вызвать трудности в связи с тем, что каждая плата первого уровня может контролировать определенное число аккумуляторов в некотором диапазоне, например от двух до четырех или от четырех до восьми. Поэтому для добавления одного аккумулятора необходимо перенастроить часть или даже все платы первого уровня.

Обычно каждая плата первого уровня, контролирующая один или несколько аккумуляторов, имеет двухсторонний гальванически развязанный интерфейс. С помощью него устройство вышестоящего уровня получает данные и выдает команды системе баланса на плате первого уровня. Каждая плата имеет свой внутренний уникальный адрес для опроса вышестоящим устройством, который устанавливается с помощью перемычек или «прошивается» в память платы до ее подключения в АБ. Подобные системы можно использовать с любыми типами Li-ion аккумуляторов (например, с литий-железо-фосфатным или литий-кобальт-оксидным катодом). При этом меняются только внутренние настройки (уставки), выставляемые в ПО СОФ. Так как интерфейс гальванически развязан, то каким образом включены аккумуляторы и их платы контроля первого уровня, также не имеет значения (последовательно и/или параллельно-последовательно и т. д.).

Рассмотренные способы построения СОФ относительно дороги как по элементной базе (комплектации, площади плат), так и по стоимости ПО. Действительно, при построении СОФ, когда каждый аккумулятор контролируется своим устройством первого уровня,

число таких устройств равно количеству аккумуляторов (рис. 1) или плат первого уровня (рис. 2), по интерфейсу циркулирует большое количество информации от/в устройство второго уровня.

Аппаратно каждая плата имеет гальванически развязанный интерфейс. Однако устанавливать на каждую плату первого уровня такой интерфейс не всегда целесообразно, если проектировать СОФ АБ под конкретный тип аккумуляторов и батарей на их основе и под конкретные задачи. Используя некоторые особенности схемы, а именно то, что аккумуляторы в АБ соединены последовательно, можно значительно сократить число микросхем гальванической развязки, тем самым не только упростив электрическую схему АБ, но и уменьшив ее стоимость. Для примера на рис. 3 показана структурная схема одного из вариантов такого решения. На рисунке для наглядности не показаны исполнительные устройства — коммутаторы, предохранители, датчик тока АБ, интерфейс для связи с внешним миром и т. д.

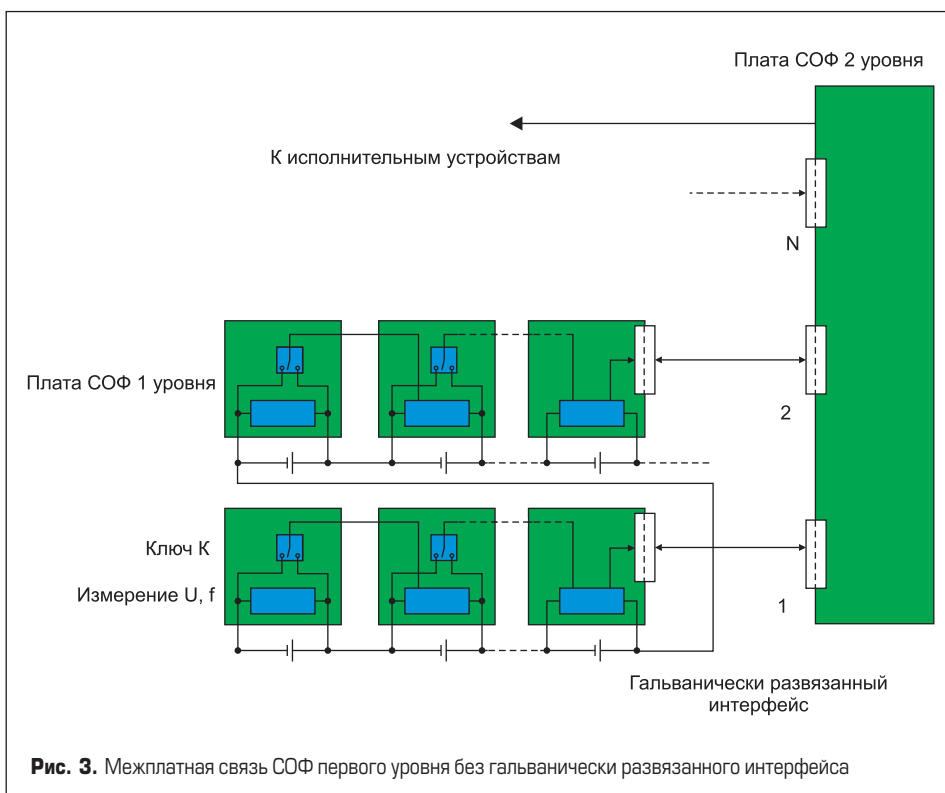
Устройство СОФ первого уровня, манипулируя ключом К, расположенным на этой же плате, передает необходимые данные в следующую плату. Ключ К замыкается на плюс или минус своего аккумулятора. Например, при замыкании ключа на плюс своего аккумулятора ток в схеме не течет, поскольку его плюс соединен с минусом следующего аккумулятора перемычкой. При замыкании на минус в схеме протекает ток. Это и идентифицируется как бит данных (схему и алгоритм взаимодействия можно построить и другим способом). Последующее устройство, принявшее данные, прибавляет к ним свои данные и передает следующей плате и т. д. Каждое последующее устройство к принятым данным добавляет свои. Чем больше последовательно

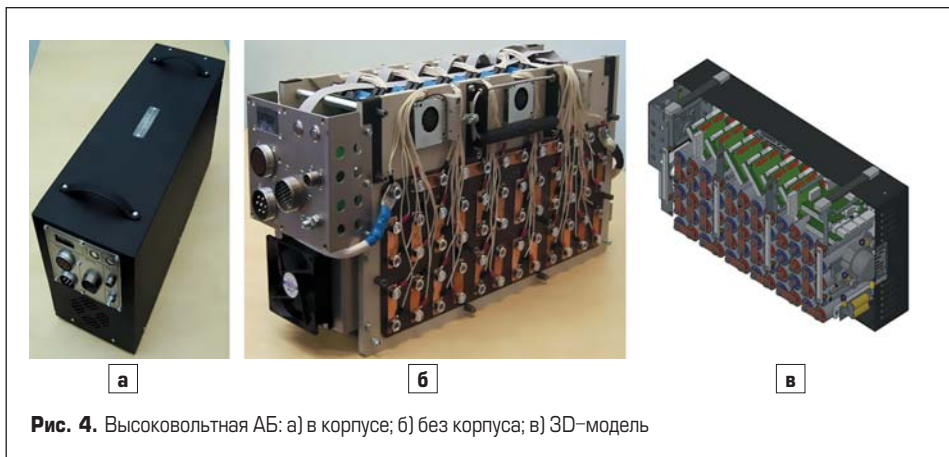
соединенных плат, тем большее количество данных должна принимать и передавать последняя в схеме плата. Как видно из схемы, гальванически развязанный интерфейс отсутствует, по крайней мере, в некоторой цепочке соединенных плат. В нем нет необходимости, так как каждое такое устройство работает в небольшом диапазоне напряжений 10–15 В, если учитывать напряжение собственного аккумулятора. Элементную базу на такое напряжение легко подобрать. Число последовательно соединенных устройств по такой схеме часто ограничено и обычно не превышает 10–20 шт., иначе последнее устройство будет занято только приемом и передачей данных.

Последняя плата имеет гальванически развязанный интерфейс, через который данные от всей цепочки передаются в СОФ второго уровня. Это сделано потому, что между последовательными цепочками может быть значительное напряжение при построении высоковольтной АБ. Таким образом, число гальванических развязок сокращается в несколько раз, все они присутствуют только там, где цепочка заканчивается и где необходимо передать данные в СОФ второго уровня. На рис. 3 гальванически развязанные интерфейсы показаны цифрами 1, 2, N.

К особенностям построения СОФ высоковольтной АБ, спроектированных по этому принципу, можно отнести следующее. Во-первых, в однопроводном интерфейсе без гальванической развязки все аккумуляторы должны быть соединены последовательно и никак по-другому, иначе данные невозможно будет передать (в отличие от обычных СОФ). Сам интерфейс односторонний, данные передаются только в СОФ второго уровня и приниматься от нее не могут. Можно организовать на этом же принципе и второй канал передачи данных от СОФ второго уровня. Алгоритм реализации будет таким же, как было описано выше. Приняв данные, устройство первого уровня передает далее только те данные, которые не предназначаются этому устройству. Таким же образом поступает и следующее устройство. Каждый раз при отборе данных, например с конца посылки, до последней платы доходит только одна-единственная посылка, предназначенная только ей. Однако при этом возникает необходимость проверить правильность передачи и состояние устройства, что приводит к циркуляции дополнительной информации в системе. В обратной связи в данном случае необходимости нет, так как второму уровню для принятия решения необходимо только получать информацию о состоянии аккумуляторов в цепочке. Необходимость передавать данные каждой плате первого уровня возникает, только если нужно управлять системой баланса этой платы.

Во-вторых, устройство первого уровня не нуждается во внутреннем сетевом адресе, его установке или прошивке перед началом эксплуатации. Место контролируемой ячейки однозначно определяется топологией или местоположением. Например, в канале 1 СОФ второго уровня пятая от начала ин-





формационная посылка соответствует пятому слева аккумулятору. Отсутствие адресов значительно упрощает монтаж и наладку всей батареи. В СОФ второго уровня необходимо только установить количество аккумуляторов и на каком канале они находятся.

В-третьих, ценой за упрощение схемотехники плат первого уровня является некоторое усложнение платы второго уровня. Она имеет несколько каналов, по которым передается информация, поэтому СОФ второго уровня должна успевать принимать все данные и обрабатывать их для принятия решения. Одновременная, асинхронная передача данных по нескольким каналам потребует значительной проработки устройства второго уровня.

Если интерфейс реализовать как одностронний, то возникает вопрос, как управлять балансирующим отдельно взятого аккумулятора в АБ. Если использовать литий-железо-фосфатные Li-ion аккумуляторы, то систему баланса также можно упростить, и она не будет нуждаться в управлении извне. Напряжение на таком аккумуляторе, даже заряженном на 100%, не может быть выше 3,45–3,55 В [3]. Достигнуть указанного напряжения можно только в процессе заряда. А это значит, что можно построить пороговое устройство, которое будет шунтировать аккумулятор с помощью резистора при достижении заданного конечного значения напряжения. Обычно для этого используется компаратор и источник опорного напряжения в корпусе SOT-23. Напряжение срабатывания установлено внутри микросхемы. Микросхема с помощью внешнего ключа (обычно транзистор) управляет шунтированием аккумулятора резистором. Когда при заряде напряжение на аккумуляторе достигает значения 3,55–3,6 В, ключ замыкается, и через аккумулятор течет ток заряда, уменьшенный на величину тока шунтирования. Те аккумуляторы, на которых напряжение не достигло указанного значения, будут заряжаться полным током. Они будут заряжаться быстрее, «догоняя» шунтированные (т. е. ушедшие вперед). После прекращения заряда напряжение на аккумуляторах опустится ниже 3,5 В, и все шунты отключатся. Таким образом осуществляется процесс нивелирования емкостей последовательно соединенных аккумуляторов в АБ. Необходимо

отметить, что для запуска процесса нивелирования необходимо полностью зарядить АБ. При этом процесс нивелирования протекает только в конце заряда, когда напряжение на железо-фосфатных аккумуляторах резко возрастает, как описано в [4].

Таким образом, используя особенности применяемых Li-ion аккумуляторов, можно значительно упростить схемотехнику и себестоимость плат первого уровня. То есть строить не универсальную СОФ, а проектировать ее под конкретные задачи и конкретный тип аккумулятора. Построенные по этому принципу СОФ применяются в электромобилях ряда производителей.

Практическая реализация

Пример практической реализации высоковольтной АБ рассмотрен на примере Li-ion АБ? разработанной в ФТИ им. А. Ф. Иоффе (рис. 4). При изготовлении АБ применяли цилиндрические Li-ion аккумуляторы (рис. 5) емкостью 7 А·ч ICNR 34/174/HP (материал положительного электрода — литированный оксид кобальта и никеля, Ø34 мм, длина 174 мм, высокомошные). Применяемые токовыводы аккумулятора (M8) позволяют снимать значительные токи разряда без существенного перегрева.

Высокомощные аккумуляторы могут разряжаться токами до 10–20 Сн·А. Изготовленная АБ, состоит из 60 последовательно соединенных аккумуляторов со среднеразрядным напряжением 3,6 В.

В таблице представлены основные технические характеристики АБ.

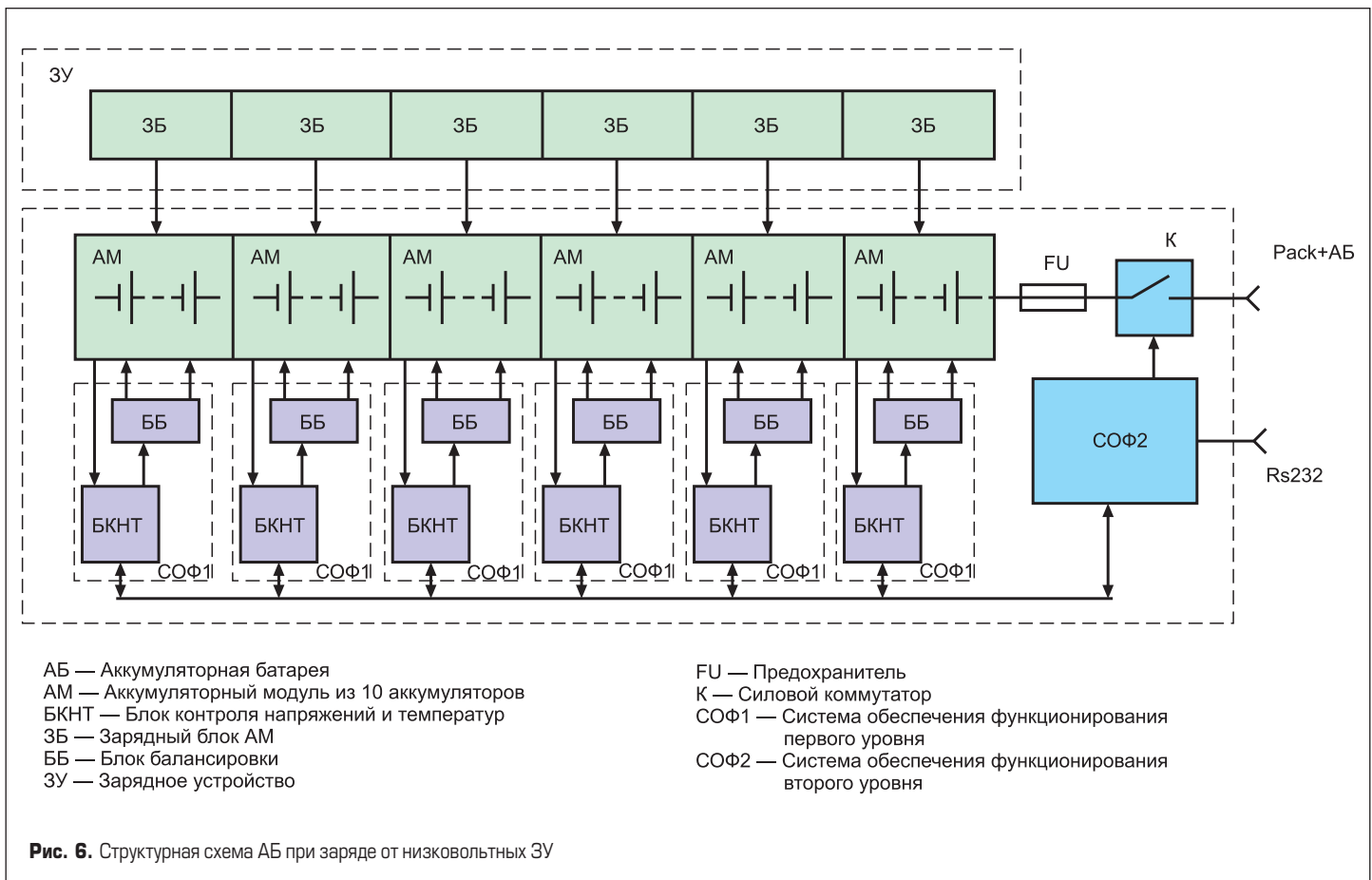
СОФ АБ спроектирована на элементной базе общего назначения без использования специализированных микросхем. Это сделано для того, чтобы не возникало сложностей при наладке, частом коммутировании и разъединении плат первого уровня. Это также позволяет менять алгоритмы функционирования при постановке экспериментов и отработке режимов работы АБ для различных применений. Платы первого уровня контролируют группы из десяти последовательно соединенных аккумуляторов, содержат управляемую пассивную систему баланса, имеют переключатели для установки адреса платы. СОФ второго уровня по гальванически развязанному

интерфейсу запрашивает и принимает данные от СОФ первого уровня. СОФ управляет работой коммутатора, выводит информацию на ЖК-дисплей (напряжение, ток всей АБ) и имеет последовательный интерфейс RS232 для связи с внешним миром. Для связи между СОФ различных уровней предусмотрен гальванически развязанный интерфейс, а также несколько аварийных линий. Данные линии используются для увеличения надежности системы при отказе последовательного интерфейса в экстренной ситуации и/или при загруженном канале связи. Платы СОФ первого уровня выставляют на этих линиях «лог.1» в тех или иных ситуациях, вне зависимости, работает канал связи или нет, были переданы данные по последовательному интерфейсу или нет. СОФ АБ содержит как программные, так и аппаратные средства защиты, работающие вне зависимости от работы микроконтроллеров СОФ.

На передней панели АБ имеются кнопки включения в работу и выключения АБ. Помимо разъемов «плюс АБ», «минус АБ» и RS232, в центре расположен опциональный многоштырьковый разъем. Он предназначен для заряда не всей АБ сразу, а отдельных ее блоков. АБ можно заряжать как высоковольтным зарядным устройством (ЗУ), через разъемы «плюс АБ» и «минус АБ» с выходным напряжением 252 В, так и шестью низковольтными ЗУ с напряжением 42 В. Это позволяет применять относительно простые и дешевые ЗУ, а также обрабатывать различные схемы заряда АБ. Каждое из низковольтных ЗУ за-

Таблица. Основные технические характеристики АБ

Номинальное напряжение, В	216
Максимальное напряжение, В	252
Минимальное напряжение, В	168
Номинальная емкость, А·ч	7
Максимальный продолжительный ток разряда, А (от Сн)	105 (15 Сн)
Максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку, кВт	22,7
Время заряда, ч	2
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+50
Количество циклов	1000
Габаритные размеры, мм	600×300×200
Масса, кг	30



ряжает свой модуль из десяти аккумуляторов. Для этого на платах первого уровня располагается реле для подключения такого ЗУ. В этом случае СОФ второго уровня только координирует работу плат первого уровня, не вмешиваясь в процесс заряда. СОФ второго уровня передает данные для правильной работы систем баланса плат первого уровня, чтобы средние напряжения модулей были примерно одинаковыми (межблочное нивелирование). АБ выглядит как шесть низковольтных батарей, каждая из которых заряжается самостоятельно от своего ЗУ. Внутри блока аккумуляторы нивелируются с по-

мощью СОФ первого уровня. Структурная схема работы при заряде от низковольтных ЗУ показана на рис. 6.

Несмотря на кажущуюся сложность и многообразие заложенных режимов работы СОФ, имеется несколько алгоритмов работы АБ с присущими им достоинствами и недостатками. Высоковольтные АБ могут изготавливаться с применением простых и надежных принципов их построения.

*Работа выполнена при поддержке
 Государственного контракта
 №16.526.11.6011 с Минобрнауки.*

Литература

1. Рыкованов А. С. Системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая электроника. 2009. № 1.
2. Рыкованов А. С. Системы обеспечения функционирования Li-ion аккумуляторных батарей. Структуры и принципы построения // Силовая электроника. 2012. № 5.
3. Рыкованов А. С. Способы балансирования портативных железо-фосфатных Li-ion аккумуляторных батарей // Компоненты и технологии. 2012. № 10.