

УДК 621.31

Е. А. Смотров, канд. техн. наук,
Д. И. Акшинцев, В. В. Субботин, А. Ю. Сусленко

СИСТЕМЫ БАЛАНСИРОВКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Аннотация. Рассмотрены основные топологии устройств пассивной и активной балансировки, раскрыты преимущества и недостатки каждой из топологий. Приведены результаты макетирования устройства активной балансировки на базе обратноходовой топологии.

Ключевые слова: система контроля аккумуляторной батареи, литий-ионный аккумулятор, балансировка ячеек, топология, преобразователь, топология с переключающимися емкостями, двухуровневая емкостная топология, прямоходовая топология, обратноходовая топология

Е. А. Smotrov, PhD.,
D. I. Akshintsev, V. V. Subbotin, A. Y. Suslenko

BALANCING SYSTEM OF ACCUMULATOR BATTERIES

Abstract. The basic topology of passive and active balancing devices is observed, advantages and deficiencies of each of topology are reflected in this paper. Results of the test of flyback topology based active balancing device are shown.

Keywords: battery management system, Li-Ion battery, balancing, topology, DC-DC converter, flyback, single switched capacitor, double tiered switched capacitor, buck-boost, forward.

Е. О. Смотров, канд. техн. наук,
Д. И. Акшинцев, В. В. Субботин, О. Ю. Сусленко

СИСТЕМИ БАЛАНСУВАННЯ АККУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Анотація. Розглянуто основні топології систем пасивного та активного балансування, розкриті переваги та недоліки кожної із них. Наведено результати макетування системи активного балансування, що працює на зворотній ході.

Ключові слова: система контролю акумуляторної батареї, літій-іонний акумулятор, балансування елементів, топологія, перетворювач, топологія з ємностями, що перемикаються, дворівнева ємнісна топологія, перетворювач на прямій ході, перетворювач на зворотній ході

Введение. В последние годы в виду широкого распространения мобильных систем (космические и воздушные, электротранспорт, бытовая техника и др.), которые имеют в своём составе автономный источник питания, широкое распространение получили химические источники питания. Среди них следует отметить литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) благодаря отличным характеристикам, которые во многом превосходят показатели других типов: большая удельная энергетическая ёмкость, отсутствие эффекта памяти, низкий уровень саморазряда и т.д. На сегодняшний день существуют различные модификации ЛИА, отличающиеся материалом катода и технологическими аспектами изготовления. Однако несмотря на различия, основные характеристики ЛИА таковы:

диапазон рабочих напряжений: 2,7 – 4,2 В;

удельная энергоёмкость: 110 – 230 Вт·ч/кг;

число циклов заряд/разряд до потери 20 % ёмкости: 600-1000;

саморазряд: 3 % в месяц при температуре +20°C;

ток нагрузки (относительно ёмкости ЛИА): импульсный – до 50С_{ЛИА}; наиболее приемлемый – до 1С_{ЛИА}, где С_{ЛИА} – номинальная ёмкость ЛИА;

диапазон рабочих температур: (0...+60) °C (при отрицательных температурах заряд батарей невозможен).

Помимо очевидных преимуществ, ЛИА обладают и недостатками, среди которых следует выделить: чувствительность к значениям минимального и максимального напряжений; невозможность зарядки ЛИА при отрицательных температурах, что влечет за собой снижение числа циклов, потерю ёмкости и, в отдельных случаях, выход ячейки из строя.

Второй недостаток определяет ограничения, накладываемые на особенности формирования режима работы ЛИА при его экс-

© Смотров Е.А., Акшинцев Д.И.,
Субботин В.В., Сусленко А.Ю., 2013

плуатации в широком температурном диапазоне. Так, неспособность ЛИА принимать зарядный ток при отрицательных температурах проявляется, например, в отсутствии рекуперативного торможения ЭТС. Для повышения срока службы батарей, работающих в условиях низких температурах, необходимо на основании данных о температуре каждой ячейки исключать работу ЛИА в запрещенных режимах и использовать дополнительное оборудование [1 – 3].

Известно, что для получения необходимого уровня напряжения ячейки ЛИА собираются последовательно-параллельно. Ячейки, входящие в состав ЛИА, обладают некоторым разбросом параметров. Во избежание выхода напряжения ячейки за допустимые пределы вследствие разброса параметров ячеек (которые зависят от ряда факторов: режима работы, условий эксплуатации) применяют системы контроля ЛИА (Battery Management System – BMS).

Эти системы производят мониторинг различных параметров батареи: напряжение на каждой ячейке, температуру в различных

точках, общий ток. Также BMS может принимать меры по защите батареи в случае выхода вышеперечисленных параметров за пределы нормы: отключать ЛИА от нагрузки, передавать по коммуникационным интерфейсам информацию о состоянии батареи, согласовывать режим работы потребителей энергии и т.д. В более развитых системах присутствует возможность балансировки параметров ячеек в процессе заряда для минимизации их разбалансировки в процессе дальнейшей работы.

Цель работы. Анализ некоторых наиболее часто применяемых систем активной и пассивной балансировки с выявлением их преимуществ, недостатков и особенностей применения, а также представление основных результатов исследования системы активной балансировки на базе обратногодвойной топологии.

Материалы исследования. Существуют различные решения систем балансировки, которые условно делят на две группы: пассивные и активные (рис. 1).



Рис. 1. Дерево балансирующих топологий ЛИА

1. Сравнительная характеристика основных топологий

Тип элемента	Преимущества	Недостатки
<i>Пассивная балансировка</i>		
Резисторная	Дешевизна, простота реализации, малые размеры	Низкий КПД, низкая скорость балансировки при больших дисбалансах и емкостях ячеек ЛИА
<i>Активная балансировка (емкостная)</i>		
<i>Switched capacitor</i> (С переключающимися ёмкостями)	Простое управление, возможность балансировки в режимах заряда, разряда ЛИА	Низкая скорость балансировки, большое количество коммутационных ключей, низкий КПД
<i>Single Switched Capacitor</i> (С одной буферной ёмкостью)	Простое управление, возможность балансировки в режимах заряд, разряд ЛИА. Один конденсатор с минимальным количеством коммутационных ключей	Удовлетворительная скорость балансировки. Для быстрой балансировки необходимо интеллектуальное управление
<i>Double Tiered Switched Capacitor</i> (Двухуровневая ёмкостная)	Сравнительно меньшее время балансировки по сравнению топологией с одной буферной ёмкостью, возможность балансировки в режимах заряда, разряда ЛИА	Удовлетворительная скорость балансировки, большое количество коммутационных ключей
<i>Активная балансировка (дроссельная)</i>		
<i>Buck-Boost</i> (Понижающая, повышающая)	Высокая скорость балансировки, проста в развертывании (при модульной реализации системы)	Высокая стоимость, необходимо интеллектуальное управление
<i>Cuk</i>	Высокий КПД	Сложность в управлении, удовлетворительная скорость балансировки
<i>Активная балансировка (трансформаторная)</i>		
<i>Forward</i> (Прямоходовая)	Хорошо подходит для балансировки большого числа ячеек, подходит для модульной системы	Низкий КПД
<i>Flyback</i> (Обратноходовая)	Проста в реализации для большого числа ячеек, высокая скорость балансировки, подходит для модульной системы, низкий КПД	Сложность в управлении, необходимо интеллектуальное управление

Пассивные системы – это системы, в которых количество заряда, вызывающего дисбаланс, рассеивается в тепло, тогда как в активных системах этот заряд передаётся в другие ячейки. Пассивные системы более просты, они применяются там, где недопустима высокая цена, не важны скорость балансировки, КПД. В основном они применяются для небольших ЛИА ($C_{\text{ЛИА}} < 15$ Ампер-часов).

Пассивная балансировка основана на подключении к каждому разбалансированному ЛИА уравнивающего резистора, на котором рассеивается некоторое количество заряда, вызывающее дисбаланс. Таким образом, происходит выравнивание по самой разряженной ячейке. Пассивные системы могут иметь в своём составе максимально-токовую защиту при заряде и разряде аккумуляторной батареи, а также защиту по

перегреву. К преимуществам системы следует отнести простоту в реализации и низкую сложность системы управления. На рис. 2 приведена схема BMS с пассивной топологией.

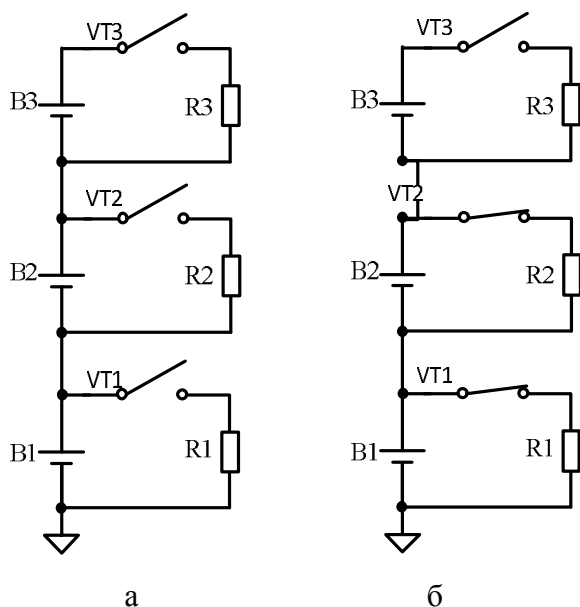


Рис. 2. Пассивная резисторная топология:
 а – ячейки обладают близкими потенциалами, выравнивания не происходит;
 б – выравнивание ячеек с избыточным зарядом B1 и B2

Активные системы балансировки применяются на мощных литий-ионных батареях (ЛИБ) ($C_{\text{ЛИА}} > 40$ Ампер-часов), где важную роль играет скорость балансировки, которая сопровождается довольно большими величинами балансирующих (уравнивающих) токов. Активные системы балансировки действуют по принципу передачи энергии от более заряженных ячеек к менее заряженным. Следовательно, потери, возникающие в процессе балансировки, связаны только с КПД выбранной системы выравнивания и зачастую не превышают 20 %.

Активные системы балансировки имеют ряд собственных схмотехнических топологий, в которых энергия из группы ячеек либо из ячейки в ячейку может передаваться путём прямого подключения к ячейке, либо посредством буферных конденсаторов или трансформаторов.

В табл. 1 приводятся преимущества и недостатки некоторых основных топологий, о которых будет рассказано ниже.

Ёмкостная балансировка – это вид балансировки, при которой передача энергии из одной ячейки ЛИБ происходит через буферные ёмкости. Таким образом, энергия сначала закачивается в буферную ёмкость, а затем из буферной ёмкости в ячейку принимающую заряд (топологии *switched capacitor*, *single switched capacitor*, *double tiered switched capacitor*). Ёмкость выступает в качестве промежуточного звена, в котором хранится передаваемый заряд.

Топология с переключающимися ёмкостями (рис. 3) содержит по буферной ёмкости на каждую ячейку и заряд может передаваться только через соседнюю ячейку, поэтому передача заряда из ячеек, отдаленных друг от друга, крайне затруднительна и энергоёмка. На рис. 3 изображен процесс передачи энергии в ячейку B1 из B3 через B2.

Топология с одной буферной ёмкостью (рис. 4) предполагает передачу заряда непосредственно из ячейки в ячейку в пределах одного модуля через буферную ёмкость. Топология подразумевает всего одну буферную ёмкость на модуль, проста в управлении, заряд в отличие от предыдущей топологии может передаваться непосредственно в слабую ячейку. Но особенностью является возможность работы в данный момент времени только с одной ячейкой, что сильно влияет на скорость балансировки, но значительно удешевляет систему за счёт сведения к минимуму активных элементов, отвечающих за передачу заряда. На рис. 4. показан процесс передачи энергии из ячейки B1 в ячейку B3.

Двухуровневая ёмкостная топология приведена на рис. 5. Эта топология балансировки является производной от топологии с переключающимися ёмкостями и во всех основных особенностях очень схожа, но время балансировки меньше в 4 раза по сравнению с исходной топологией. Это достигается введением дополнительного конденсатора параллельно двум смежным конденсаторам на две смежных ячейки.

При дроссельной балансировке активным элементом при переносе заряда выступает дроссель. Для более быстрого перераспределения заряда в больших ЛИА необходимы большие уравнивающие токи.

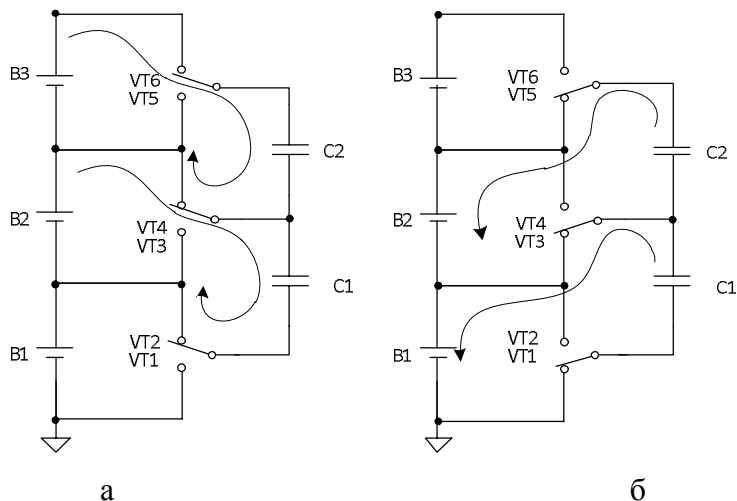


Рис. 3. Процесс передачи энергии в топологии с переключающимися ёмкостями: а – заряд промежуточных емкостей C1 и C2; б – заряд ячеек от промежуточных емкостей

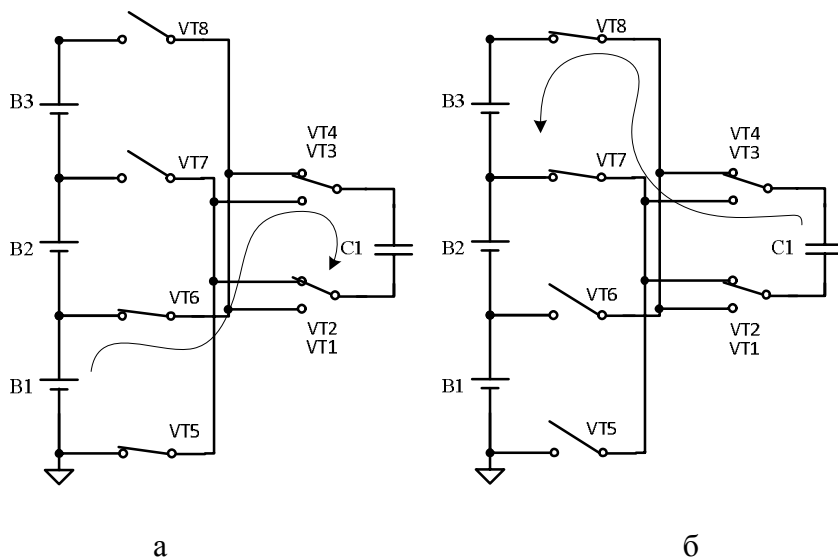


Рис. 4. Передача энергии в топологии с одной буферной ёмкостью: а – заряд буферной емкости C1 от ячейки B1; б – заряд ячейки B3 от буферной емкости C1

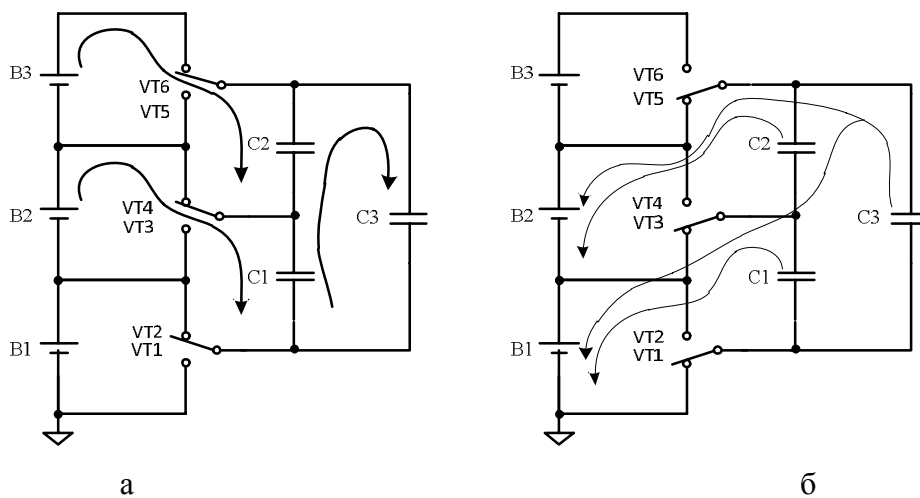


Рис. 5. Передача энергии в двухуровневой емкостной топологии: а – заряд буферных емкостей C1-C3; б – заряд ячеек B1 и B2

Увеличение тока ведет к увеличению массогабаритных показателей дросселя и цепи системы. Для быстрой балансировки такой системе необходимо также интеллектуальное управление. Заряд может передаваться как от одной ячейки к нескольким, так и от нескольких к одной, или из ячейки в ячейку. Такие системы обладают высоким КПД. Наиболее популярные топологии основаны на использовании DC-DC преобразователей, таких как BuckBoost и Cuk.

Топология Cuk (рис. 6) предполагает использование двунаправленного преобразователя, который позволяет быстро передавать энергию, но только в смежные ячейки. Таким образом, если батарея состоит из большого количества ячеек, а энергию необходимо передать из самой нижней в самую верхнюю ячейки, то энергия будет передаваться поэтапно на уровень вверх, пока не достигнет самой верхней ячейки. Поэтому такая система имеет низкую скорость балансирования ячеек. В трансформаторных системах балансировки в качестве активного элемента выступает сердечник трансформатора и его обмотки. Передача энергии возможна от ячейки к ячейке, от ячейки в батарею и из батареи в ячейку. Наиболее распространены топологии: прямоходовая и обратногоходовая. В среднем обе обладают высоким КПД и хорошей скоростью балансирования.

Применение обратногоходовой топологии синхронным выпрямлением позволяет увеличить КПД устройства, что особенно заметно скажется в низковольтных устройствах. Данная топология удобна также для многоканальной зарядки в виду того, что для вторичных обмоток трансформатор является источником тока. Это увеличивает эффективность заряда и упрощает управление. Модульная реализация такой системы даёт возможность дальнейшего наращивания ячеек в ЛИБ. А опыт работы с традиционной обратногоходовой топологией позволит сократить время на разработку устройства.

Принцип действия обратногоходовой топологии иллюстрирован на рис. 7. Во время первого такта энергия закачивается из группы ячеек в трансформатор (рис. 7, а). Во время второго такта энергия передаётся из трансформатора в каждую ячейку в отдель-

ности (рис. 7, б). На каждой ячейке в пределах модуля измеряется напряжение. Затем система контроля после определённых измерений и расчётов выбирает ячейки с меньшим уровнем напряжения, так как по уровню напряжения косвенно можно судить о состоянии заряда. После чего начинается их балансировка до того момента, пока уровень напряжения на балансируемых ячейках не достигнет заданного системой.

Для исследования вопроса о повышении КПД путем применения синхронного выпрямления был проведено макетирование и сравнение устройств балансировки с диодами в выходных обмотках (традиционная схема) и с ключами (синхронное выпрямление). Функциональная схема макета изображена на рис 8.

Блок задания (БЗ) предназначен для формирования задания токов вторичных обмоток – токов балансировки. Через устройство согласования поступает на вход микроконтроллера (МК). Макет выполнен на базе МК STM32F103RBT6.

В качестве датчика напряжения (ДН) используется операционный усилитель LM324, работающий в дифференциальном режиме.

Сигналы о напряжениях ячеек поступают в АЦП МК и на основании этих сигналов в блоке расчета скважностей (БРС) формируются длительности работы каждого ключа. В качестве силовых ключей первичной и вторичной обмоток использованы ключи IRF2804S-7PbF и IRFH6200TRPbF соответственно. Для уменьшения динамических потерь в силовых ключах используется комплементарная пара биполярных транзисторов ММВТА06W и ММВТА06L, которые могут обеспечить большой импульсный ток в затворы силовых ключей, тем самым заменяя драйвер.

Необходимо помнить, что при синхронном выпрямлении вторичного напряжения может иметь место изменение направления тока, в отличие от классической обратногоходовой топологии. Чтобы исключить возможность инвертирования тока, необходимо закрывать ключ в момент спадания тока до нуля. В устройстве моменты времени для открытия и закрытия транзисторных ключей выходных обмоток достигаются прямым

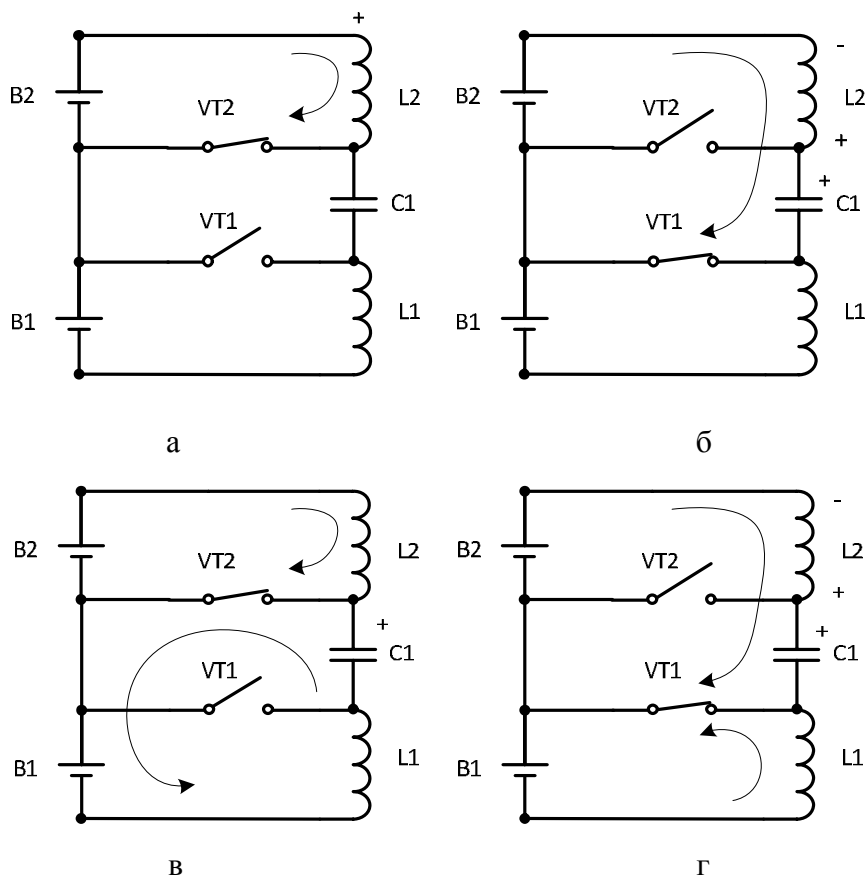


Рис. 6. Передача энергии в Cuk топологии:

а – процесс накачки энергии в индуктивность L2; б – заряд промежуточной емкости C1; в – процесс накачки энергии в индуктивности L2 и заряд ячейки B1, сопровождающийся процессом накачки энергии в индуктивность L1; г – заряд промежуточной емкости C1 и заряд ячейки B1 при помощи энергии, запасенной в индуктивности L1

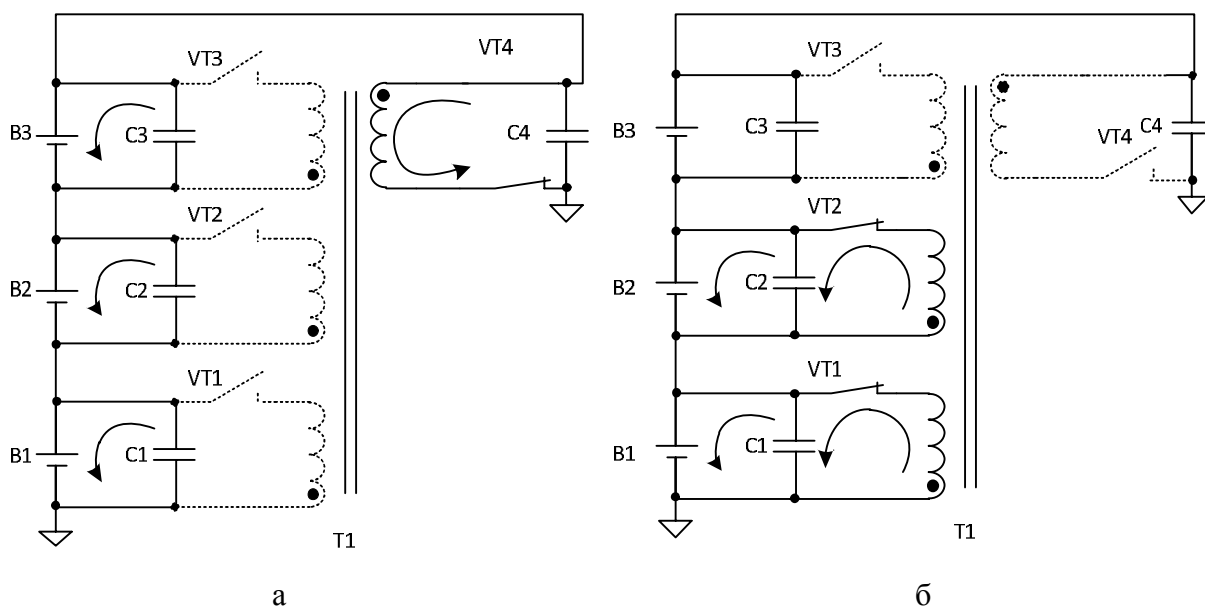


Рис. 7. Передача энергии в BMS с обратнoходовой топологией:

а – процесс запасаения энергии в первичной обмотке;
 б – процесс заряда выбранных ячеек (B1 и B2)

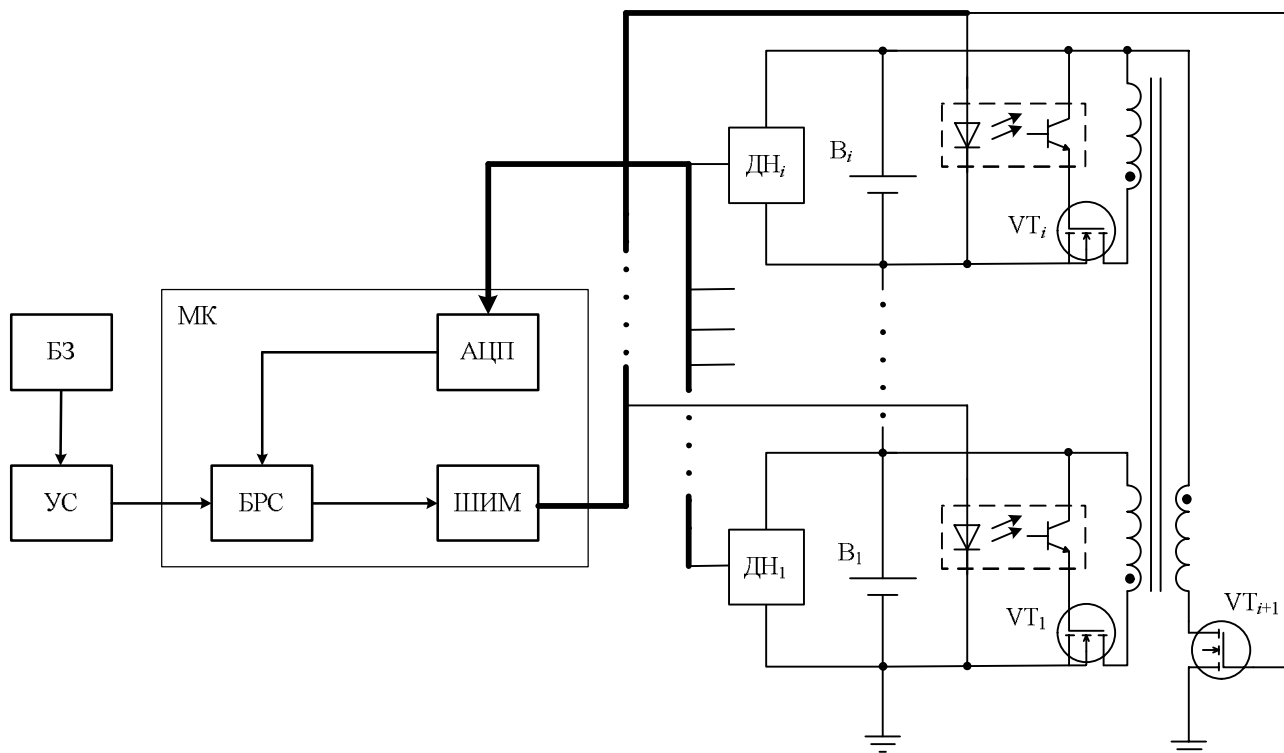


Рис. 8. Функциональная схема устройства с активной балансировкой ячеек на базе обратноходовой топологии

расчетом. При наличии обратной связи по току вторичных обмоток возможно повысить точность расчета, однако этот метод предполагает наличие датчика тока в каждой вторичной обмотке, что существенно увеличивает цену устройства. Другим вариантом является расчет необходимой скважности для каждого выходного ключа VT_1-VT_i на основании известных постоянных параметров (индуктивность рассеяния, собственная индуктивность, частота коммутации) и данных о напряжении ячейки.

Дополнительная сложность возникает также при управлении силовыми транзисторными ключами: при согласовании уровней управления, поступающих с системы управления, с уровнями, необходимыми для управления силовыми транзисторами. Проблема решается введением в цепь управления оптронной или трансформаторной развязки.

Экспериментальный график КПД при работе устройства балансировки на ЛИА, состоящий из трех ячеек типа SLPB80460330H, приведен на рис. 9. Ячейка характеризуется следующими данными: номинальная емкость 106 Ампер-часов, номинальное напряжение

3,7 В, внутренне сопротивление менее 0,55 мОм. Для снятия кривой КПД задавалась фиксированная величина выходного тока, которую поддерживало устройство балансировки. Из рисунка видно, что применение синхронного выпрямления по сравнению с традиционной схемой обратноходового преобразователя позволило увеличить КПД на 10-15 %. Дальнейшее снижение потерь возможно путем формирования оптимальной траектории переключения силовых ключей и оптимальном проектировании трансформатора.

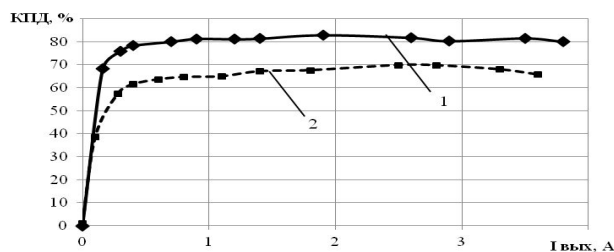


Рис.9. Коэффициент полезного действия для одного канала устройства балансировки: 1 – с применением синхронного выпрямления; 2 – по традиционной схеме

Вывод. Балансировка ячеек является ключевой задачей систем управления АБ, так как дисбаланс ячеек имеет место в любой ЛИБ. Система контроля аккумуляторной батареи увеличивает срок службы батареи и обеспечивает безопасность при её использовании.

При выборе активной топологии следует иметь в виду, что:

наиболее просто система управления реализуется в обратнотоположной топологии и топологии с переключающимися емкостями;

массогабаритные показатели у емкостных топологий меньше, чем у прочих перечисленных;

перечисленные трансформаторные топологии работают только при заряде ячеек (выравнивание обычно начинают на заключительных этапах заряда);

остальные топологии работают как при заряде, так и при разряде.

Применение обратнотоположной топологии удобно для большого числа ячеек. Применение синхронного выпрямления позволяет минимизировать потери проводимости (при правильном выборе силовых ключей). Дальнейшее увеличение КПД возможно при уменьшении динамических потерь в ключах и потерь в трансформаторе. Недостатками применения синхронного выпрямления является увеличивающееся число элементов (силовые ключи, драйверы), увеличение сложности управления в ряде случаев необходимость дополнительных датчиков для построения системы управления.

Универсальных рекомендаций по выбору той или иной топологии нет, многое зависит от опыта разработчика и требований, предъявляемых к системе.

Список использованной литературы

1. Вершинин Д. В. Некоторые аспекты работы автономного источника питания электротранспортного средства [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2010. – № 01 (77). – С. 6 – 12.

2. Вершинин Д. В. Система регулирования тока батареи конденсаторов бортового

источника питания электротранспортного средства [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // *Электромашинное и Электрооборудование*. – 2009. – № 72(3). – С. 43 – 49.

3. Смотров Е. А. Рекуператор бортового источника питания электротранспортного средства [Текст] / Е. А. Смотров // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – № 02 (78). – С. 7 – 12.

4. Danilov D. Adaptive battery management systems for the new generation of electrical vehicles [Text] / D. Danilov and P. H. L. Notten // 5-th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Department of Chemical Engineering and Chemistry, Energy Materials and Devices Group, Eindhoven University of Technology.

DOI : 10.1109/VPPC.2009.5289835.

URL : <http://libgen.org/scimag4/10.1109/VPPC.2009.5289835.pdf>.

5. Jong-Won S. Selective Flyback Balancing Circuit with Improved Balancing Speed for Series Connected Lithium-ion Batteries [Text] / [Jong-Won S., S. Gab-Su, C. Chang-Yoon and others] // International Power Electronics Conference. – 2010. – P. 1180 – 1184.

DOI : 10.1109/IPEC.2010.5543502.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/IPEC.2010.5543502.pdf>.

6. Kim H. Scheduling of battery charge, discharge, and rest. [Text] / H. Kim, and K.G. Shin Proceedings // Real-Time Systems Symposium, Real-Time Computing Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science Date 05.08.2013.

DOI : 10.1109/RTSS.2009.38.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/RTSS.2009.38.pdf>.

7. Ming Tang. Selective Buck-Boost Equalizer for Series Battery Packs [Text] / Ming Tang and T. Stuart // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. – 2000. – Vol. 36. – № 1. – P. 201 – 211.

DOI : 10.1109/7.826322.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/7.826322.pdf>.

8. Mohamed D. Passive and active system balancing comparison based on MATLAB simulation [Text] / [D. Mohamed, O. Noshin, P. Bosshe and others] // Vehicle Power and Pro-

pulsion Conference (VPPC), 2013. –2011 IEEE. – P. 1 –7. DOI : 10.1109/VPPC.2011.6043010. URL : <http://sci-hub.org/pdf-cache/d1879de7d6841952aea33e-132d0fd19f.pdf>.

9. Sang-Hyun P. A new Battery Equalizer Based on Buck-boost Topology [Text] / [P. Sang-Hyun, K. Tae-Sung, P. Jin-Sik and others] // 7-th International Conference on Power Electronics. –2007. – P. 962 – 965.

DOI : 10.1109/ICPE.2007.4692526.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/ICPE.2007.4692526.pdf>.

10. Wang L. Optimized energy storage system design for a fuel cell vehicle using a novel phase shift and duty cycle control [Text] / L. Wang, , Z. Wang and H. Li. // 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Center for Advanced Power Systems.

DOI : 10.1109/ECCE.2009.5316429.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/ECCE.2009.5316429.pdf>.

11. Xu J. SOC Based Battery Cell Balancing with a Novel Topology and Reduced Component Count [Text] / [J. Xu, S. Li, C. Mi and others] // *Energies*, 6. – 2013 – P. 2726 – 2740.

URL : <http://sci-hub.org/pdfcache/d2342fabc9d5202e62313ad1457fb3a.pdf>.

Получено 25.07.2013

References

1. Vershinin D. V. Some Aspects of Working Independent Power Supply of Electric Vehicle [Text] / D. V. Vershinin, V. A. Voytenko, E. A. Smotrov // *Electrotechnic and Computer Systems*. –2010. – Iss. 01 (77). – P.6 – 12 [in Russian].

2. Vershinin D. V. Control System of Capacitors Current of the Supply Source of Electrical Vehicle [Text] / D. V. Vershinin, V. A. Voytenko, E. A. Smotrov // *Electromachine building and Electrical equipment*. – 2009. – Iss. 72. – C. 43 –49 [in Russian].

3. Smotrov E. A. Systems Recuperator of the on-board Power Supply of the Electric Vehicle [Text] / E. A. Smotrov // *Electrotechnic and Computer*. – Kyiv : – 2011. – Iss. 2 (78). – P. 7 – 12 [in Russian].

4. Danilov D. Adaptive Battery Management Systems for the new Generation of Elec-

trical Vehicles [Text] / D. Danilov and P. H. L. Notten // 5-th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Department of Chemical Engineering and Chemistry, Energy Materials and Devices Group, Eindhoven University of Technology. – 2009 [in English].

DOI : 10.1109/VPPC.2009.5289835.

URL : <http://libgen.org/scimag4/10.1109/VPPC.2009.5289835.pdf>.

5. Jong-Won S. Selective Flyback Balancing Circuit with Improved Balancing Speed for Series Connected Lithium-ion Batteries [Text] / [S. Jong-Won, S. Gab-Su, C. Chang-Yoon and others] // *International Power Electronics Conference*. – 2010. – P. 1180 – 1184 [in English].

DOI : 10.1109/IPEC.2010.5543502.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/IPEC.2010.5543502.pdf>.

6. Kim H. Scheduling of Battery Charge, Discharge, and rest. [Text] / H. Kim and K.G. Shin Proceedings // *Real-Time Systems Symposium, Real-Time Computing Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science*. – 2009 [in English].

DOI : 10.1109/RTSS.2009.38.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/RTSS.2009.38.pdf>.

7. Ming Tang. Selective Buck-Boost Equalizer for Series Battery Packs [Text] / Ming Tang and T. Stuart // *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*. – 2000. – Vol. 36. – № 1. – P. 201 – 211 [in English].

DOI : 10.1109/7.826322.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/7.826322.pdf>.

8. Mohamed D. Passive and Active System Balancing Comparison Based on MATLAB Simulation [Text] / [D. Mohamed, O. Noshin, P. Bosshe and others] // *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) – 2013. – 2011 IEEE*: – P. 1 – 7 [in English].

DOI :10.1109/VPPC.2011.6043010.

URL : <http://sci-hub.org/pdfcache/d1879de7d6841952aea33e132d0fd19f.pdf>.

9. Sang-Hyun P. A new Battery Equalizer Based on Buck-boost Topology [Text] / [P. Sang-Hyun, K. Tae-Sung P., Jin-Sik and others] // 7-th International Conference on Power Electronics. – 2007. – P. 962 – 965 [in English].

DOI : 10.1109/ICPE.2007.4692526.URL:
<http://libgen.org/scimag5/10.1109/ICPE.2007.4692526.pdf>.

10. Wang L. Optimized Energy Storage System Design for a Fuel cell Vehicle Using a Novel Phase Shift and Duty Cycle Control [Text] / L. Wang, Z. Wang and H. Li // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Center for Advanced Power Systems. – 2009 [in English].

DOI : 10.1109/ECCE.2009.5316429.

URL: <http://libgen.org/scimag5/10.1109/ECCE.2009.5316429.pdf>.

11. Xu J. SOC Based Battery Cell Balancing with a Novel Topology and Reduced Component Count [Text] / [J. Xu, S. Li, C. Mi and others] // *Energies*, 6. – 2013. – P. 2726 – 2740 [in English].

URL : <http://scihub.org/pdfcache/d2342fafcb9d5202e62313ad1457fb3a.pdf>.



Смотров Евгений Александрович,
канд. техн. наук,
вед. инж. НТЦ
«Станкосерт»,
тел. 048-728-85-05



Акшинцев
Денис Игоревич,
студент каф. ЭМСКУ
Одесского нац. поли-
техн. ун-та,
тел. 048-728-85-05



Субботин Виктор
Владимирович,
студент каф. ЭМСКУ
Одесского нац. поли-
техн. ун-та



Сусленко
Александр Юрьевич,
аспирант каф. КСУ
Одесского нац.
политехн. ун-та