

УДК 629.331

ОБЗОР ТОПОЛОГИЙ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДОМ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А. С. Зайцев, студент / А. А. Смирнов, к. т. н., доц. / Д. О. Бутарович, к. т. н., доц.
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время всё более широкое распространение получают электрические транспортные средства, такие как электробусы, троллейбусы с увеличенным запасом автономного хода, автомобили с гибридными силовыми установками и т. д., использующие в качестве тягового источника энергии аккумуляторные батареи. При этом массовому распространению данных транспортных средств сопутствует как появление новых алгоритмов эффективного расхода энергии [1], так и улучшение характеристик тяговых аккумуляторных батарей, то есть рост плотности энергии, увеличение допустимых токов зарядки и разрядки, КПД и т. д.

Наиболее часто в состав тяговых батарей входит множество соединённых определённым образом небольших ячеек, являющихся химическими источниками энергии, на основе лития (см. рис. 1).

Для того чтобы увеличить плотность энергии, необходимо изменить химический состав или технологию про-

изводства ячеек, поэтому для улучшения их удельных показателей требуется большое количество исследований. Допустимый ток зарядки определяется как химическим составом, так и эффективностью отвода тепла от аккумуляторных ячеек, что требует разработки воздушных, жидкостных или иных систем термостатирования. КПД батареи определяется эффективностью использования заряда ячеек, что требует проектирования специализированных систем управления.

Такие системы управления зарядом тяговой батареи (Battery Management System, BMS) транспортного средства выполняют ряд основных функций, рассмотренных ниже.

1. Контроль напряжения на ячейках.

В зависимости от применяемой в ячейке химии существуют границы рабочих напряжений на ячейке. Напряжение на полностью заряженной ячейке имеет максимальное значение, при разряде оно снижается, достигая минимума при полной разрядке. В табл. 1 приведён пример минимальных и максимальных напряжений для некоторых видов литийионных ячеек. Соблюдение данных ограничений критически важно, так как в противном случае это приводит к ухудшению выходных характеристик батареи и даже к отказу ячейки [2].



Рисунок 1. Тяговая батарея автомобиля Tesla Model S

Таблица 1. Границы рабочих напряжений некоторых типов ячеек литийионных батарей

Химический состав катода	Химическая формула	Сокращение для обозначения типа ячейки	Рабочее напряжение (min/max), В	Производитель
Фосфат литий-железа	LiFePO_4 , LiFeYPO_4	LFP	2,5/3,65	BYD, Lishen, «Лиотех», Winston Battery
Оксид литий-кобальта (III)	LiCoO_2	LCO	3,0/4,2	Samsung
Литий-оксид марганца	LiMn_2O_4	LMO	3,0/4,2	GRST
Литий-никель-марганец-оксид кобальта	LiNiMnCoO_2	NMC (NCM)	3,0/4,2	Kokam, Microvast, Lishen, Enerdel, CALB, LG, A123
Литий-никель-кобальт-оксид алюминия	LiNiCoAlO_2	NCA	3,0/4,2	Panasonic
Титанат лития	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	LTO	1,8/2,75	Toshiba, Microvast, XALT

2. Контроль тока заряда и разряда.

Данная функция системы BMS позволяет осуществлять контроль нормальной работы батареи в процессе зарядки или разрядки.

3. Контроль температуры ячеек.

Контроль температуры позволяет регулировать работу системы термостатирования (Thermal Management System, TMS) и производить аварийное отключение аккумуляторных батарей до их повреждения или возгорания.

4. Контроль степени заряда батареи (State of Charge, SOC).

Указанная функция является неотъемлемой частью систем BMS, так как текущее значение SOC даёт водителю информацию о доступном заряде батареи [3] и является аналогом датчика уровня топлива в обычном автомобиле.

5. Контроль состояния ячеек (State of Health, SOH).

В ходе эксплуатации батареи наблюдается непрерывный процесс деградации аккумуляторных ячеек, то есть процесс потери ёмкости по сравнению с номинальной. Контроль такого параметра, как SOH [4], позволяет определить момент, когда дальнейшая эксплуатация батареи невозможна.

6. Обеспечение коммуникации батареи с контроллером тягового электропривода транспортного средства посредством CAN-интерфейса.

Данная функция также необходима для обмена информацией между батареей и зарядной станцией. Использование именно CAN-интерфейса обусловлено его широкой распространённостью в автомобильной технике [5].

7. Управление подключением батареи к высоковольтной сети транспортного средства и её отключением.

Для обеспечения безопасности необходимым требованием, предъявляемым к тяговым аккумуляторным батареям, является возможность их автоматического отключения от сети транспортного средства при возникновении короткого замыкания, возгорания, критическом снижении сопротивления изоляции и т. д., а также по требованию водителя [6].

8. Балансировка заряда между ячейками.

Поскольку напряжение на ячейке зависит от степени заряда (SOC) и, как указывалось выше, имеет жёсткие ограничения, система BMS определяет допустимую степень разряда батареи по ячейке, имеющей минимальное напряжение. Система BMS сигнализирует о полном разряде батареи при достижении на какой-либо ячейке минимального допустимого напряжения для предотвращения выхода данной ячейки из строя. При этом другие ячейки батареи всё ещё могут иметь заряд.

Аналогично при заряде допустимая степень зарядки батареи определяется по ячейке, имеющей наибольшее напряжение. Система BMS запрещает процесс заряда при достижении максимального допустимого напряжения на какой-либо ячейке, при этом остальные ячейки батареи могут оказаться недозаряженными.

Именно функция балансировки позволяет более эффективно расходовать энергию батареи путём поддержания ячеек примерно в одинаковом состоянии по степени заряда [7].

Для реализации всех описанных выше функций наиболее часто применяются системы BMS, построенные с использованием архитектуры Master-Slave, при которой в системе выделяется одно ведущее устройство (Master), осуществляющее управление одним или несколькими ведомыми устройствами (Slave). При этом функции Master и Slave строго разделены: Slave-контроллеры отвечают за контроль напряжения ячеек батареи, температуру и балансировку, а также определяют SOC и SOH для подключённых к ним ячеек, то есть выполняют функции нижнего уровня. Master-контроллер реализует функции верхнего уровня, то есть производит сбор информации от Slave-контроллеров, определяет SOC и SOH всей батареи, обеспечивает обмен информацией с другими блоками управления транспортного средства, контролирует процесс предзаряда батареи и управляет подключением батареи к зарядной станции.

По способу реализации архитектуры Master-Slave BMS разделяют на системы:

- 1) с распределённой топологией;
- 2) с централизованной топологией;
- 3) с модульной топологией.

Далее в статье подробно описаны как достоинства, так и недостатки, присущие каждой из существующих топологий систем BMS, с точки зрения эффективности выполнения основных функций, приведённых выше.

РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ТОПОЛОГИЯ

На рис. 2 показана функциональная схема системы BMS, построенной на основе распределённой топологии.

Согласно данной схеме, BMS построена с применением множества Slave-контроллеров (один Slave для каждой ячейки) и одного Master-контроллера, координирующего работу Slave-контроллеров. Системы BMS с распределённой топологией применяются в основном в батареях, построенных с применением ячеек, имеющих возможность винтового соединения с высоковольтными токоведущими шинами (см. рис. 3). Как видно из рисунка, в данном случае имеется возможность компактного и надёжного размещения Slave-контроллеров в батарее.

К достоинствам систем BMS с распределённой топологией можно отнести следующие факторы.

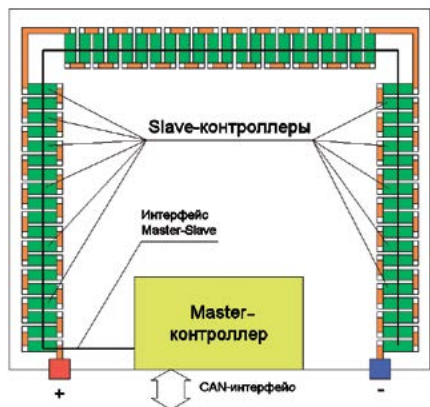


Рисунок 2. Функциональная схема распределённой системы BMS



Рисунок 3. Размещение Slave-контроллеров распределённой BMS на аккумуляторных ячейках с винтовым соединением

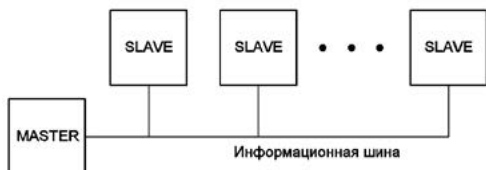


Рисунок 4. Параллельное подключение Slave-контроллеров к шине данных

1. Простота построения Slave-контроллеров.

Так как каждый Slave непосредственно подключён только к одной ячейке, становится возможным применение простейших компонентов.

2. Высокая отказоустойчивость.

В случае параллельного подключения Slave-контроллеров к шине данных (см. рис. 4) выход из строя одного или нескольких элементов сети не нарушает работу

других элементов. Таким образом, при повреждении некоторых Slave-модулей контроль над другими ячейками не будет утерян.

При этом системы BMS, построенные по распределённой топологии, имеют ряд недостатков.

1. Плохая расширяемость.

Так как все Slave-контроллеры обмениваются информацией по одной шине с Master-контроллером, координирующим их работу, большое число ячеек в батарее подразумевает высокую нагрузку на данную шину, что ограничивает возможное количество ячеек до нескольких сотен.

2. Повышенная нагрузка на Master-контроллер.

Master-контроллер должен контролировать включение и выключение балансировки на каждой ячейке, что требует хранения больших массивов данных.

На основе приведённых достоинств и недостатков можно сделать вывод, что системы BMS, построенные по распределённой топологии, являются оптимальным решением для батарей, имеющих небольшое количество ячеек. В табл. 2 приведены характеристики распределённых систем BMS, присутствующих на рынке на сегодняшний день.

ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ ТОПОЛОГИЯ

Централизованная топология систем BMS (см. рис. 5) предполагает использование только одного центрального Master-контроллера, при этом использование Slave-контроллеров не предусмотрено.

Так как все ячейки батареи подключаются непосредственно к контроллеру, можно выделить несколько очевидных недостатков такой топологии BMS.

1. Высокие требования к вычислительной мощности контроллера.

Данный недостаток следует из того, что Master-контроллер должен выполнять как функции верхнего уровня, так и функции нижнего уровня, что требует выполнения большого числа операций за довольно короткое время (как правило, от 100 до 1 000 мс).

Таблица 2. Характеристики некоторых BMS с распределённой топологией

Производитель	Модель	Поддерживаемый химический состав литиевых ячеек	Максимальное число последовательно соединённых ячеек, шт.
Elithion (США)	Lithiumate	Все виды	255
Elektromotus (Литва)	Emus BMS	Все виды	254
123electric (Нидерланды)	BMS	LFP	255
Elite Power Systems (Китай)	—	LFP	200
EV Power (Австралия)	BCU-PEV	LCO, LMO, NMC, NCA, LFP	96
EV Lithium (Норвегия)	EV Lithium Mini BMS	LFP	400
GWL Power (Чехия)	BMS2405	LFP, LTO	24
LiPoTech (Италия)	BMS 2.0	LFP	300

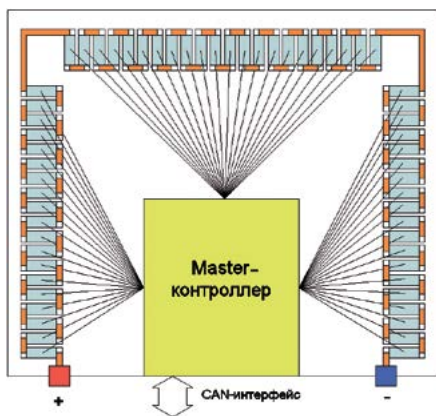


Рисунок 5.
Функциональная
схема централи-
зованной системы
BMS

2. Плохая расширяемость.

Данный недостаток обусловлен тем, что для подключения дополнительных ячеек к Master-контроллеру в нём должны быть предусмотрены дополнительные разъёмы. Таким образом, при добавлении в батарею более 10 ячеек обычно требуется замена платы Master-контроллера.

3. Плохая отказоустойчивость.

Поскольку в данной системе все основные функции BMS сконцентрированы в одном устройстве, то его отказ влечёт за собой выход из строя всей батареи.

В то же время такая топология имеет следующие положительные качества.

1. Простота сборки.

При сборке требуется только подключение ячеек к разъёмам Master-контроллера и не требуется размещение и закрепление Slave-контроллеров.

2. Простота программного обеспечения.

По сравнению с другими типами BMS централизованная система не требует разработки коммуникационных протоколов взаимодействия Master-контроллера и Slave-контроллеров.

В настоящее время централизованные системы BMS не производятся серийно для транспортных средств по причине большого количества ячеек в тяговых батареях. Системы с такой топологией применяются в портативных зарядных устройствах и устройствах балансировки для небольших батарей (см. табл. 3).

Таблица 3. Характеристики некоторых BMS с централизованной топологией

Производитель	Модель	Поддерживаемый химический состав литиевых ячеек	Максимальное число последовательно соединённых ячеек, шт.
Chargery (США)	50010B	LCO, LMO, NMC, NCA, LFP	30
Ewert (США)	OrionBMS	Все виды	180
Lithium Balance (Дания)	с-BMS	Все виды	24

МОДУЛЬНАЯ ТОПОЛОГИЯ

В системах BMS с модульной топологией (см. рис. 6), так же как и в системах с распределённой топологией, используются Master-контроллер и несколько Slave-контроллеров. Отличие заключается в том, что при модульной топологии к одному Slave-контроллеру подключается несколько ячеек.

Так как в настоящее время на рынке предлагаются батареи для множества применений, состоящие из сотен и тысяч ячеек, то расширяемость системы BMS является решающим фактором выбора топологии.

Модульные системы BMS являются наиболее распространёнными на рынке на сегодняшний день именно вследствие хорошей расширяемости. Так, если Slave-контроллеры подключены к Master-контроллеру посредством шины данных (CAN, RS-485 и т. д.), то, добавив один или несколько Slave-контроллеров, можно значительно увеличить допустимое количество ячеек в батарее. Именно это свойство позволяет строить тяговые батареи номинальным напряжением до нескольких тысяч вольт.

Хорошая расширяемость обеспечивает такое важное конкурентное преимущество батареи, как модульность. С точки зрения конструкции батарея разбивается на модули, содержащие в себе несколько десятков ячеек и имеющие номинальное напряжение, как правило, до 100 В. Таким образом, заказчик имеет возможность регулировать напряжение батареи, изменяя число таких модулей.

Хотя модульные системы BMS являются наиболее гибкими и распространёнными, они также имеют ряд недостатков.

1. Сложность разработки Slave-контроллеров.

Так как в данном случае к Slave-контроллеру подключено несколько ячеек, требуется применение специализированных схем балансировки и измерения напряжения на них.

2. Сложность программного обеспечения.

Программное обеспечение требует разработки сразу трёх интерфейсов: интерфейса взаимодействия контрол-

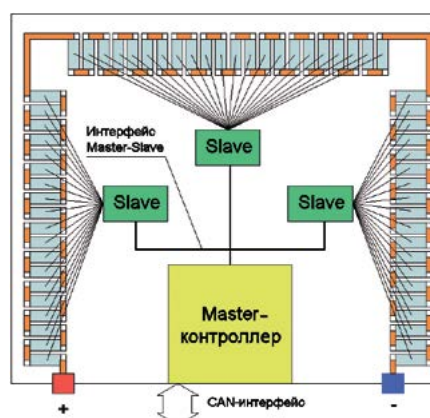


Рисунок 6.
Функциональная
схема модульной
системы BMS

Таблица 4. Характеристики некоторых BMS с модульной топологией

Производитель	Модель	Поддерживаемый химический состав ячеек	Максимальное число ячеек, шт.
Lithium Balance (Дания)	LIBAL	Все виды	255
Movicom (Россия)	Movicom BMS	Все виды	240
Ligoo (Китай)	B5	Все виды	400
EVPST (Китай)	—	Все виды	255
Flux Power (США)	BMS	LFP	256
I + ME Actia (Германия)	BMS	LTO, LFP	255
Manzanita Micro (США)	MK3x8	Все виды	10 000
REAP Systems (Великобритания)	REAP	Все виды	168
REC (Словения)	REC BMS	Все виды	240
Elithion (США)	Vinci EV	Все виды	1 488
Valence (США)	U-BMS	LFP	768

леров Slave и Master, интерфейса взаимодействия Master-контроллера с другими Master-контроллерами (если на транспортном средстве используется несколько батарей) и интерфейса взаимодействия Master-контроллера и блоков управления транспортного средства.

3. Плохая отказоустойчивость.

Так как все элементы системы имеют сложную схемотехнику, высока вероятность их выхода из строя вследствие короткого замыкания, обрыва цепи, перегрева и т. д. При этом отказ одного из элементов ведёт к потере контроля сразу над группой ячеек, что требует немедленного отключения батареи от нагрузки.

В табл. 4 приведены некоторые модели производимых серийно систем BMS с модульной топологией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время существует множество способов реализации систем BMS на основе всех представленных топологий. На архитектуру системы влияют такие факторы, как количество ячеек в батарее, её максимальное напряжение, допустимые токи заряда и разряда, требования безопасности, компонентная база и т. д.

На основе приведённого анализа можно сделать вывод о том, что BMS, имеющие модульную топологию, являются наиболее гибкими по отношению к форме и параметрам ячеек. Анализ состава тяговых батарей таких производителей, как Forsee Power, EnerDel, E-Power и др., показывает, что выбор производителями топологии BMS наиболее часто склоняется в пользу модульных систем. Это обусловлено большим количеством ячеек (более 1 000) в составе тяговых батарей транспортных средств.

При этом наличие доступной компонентной базы позволяет снизить трудоёмкость проектирования систем BMS с модульной топологией (путём применения специализированных микросхем [8]), а также обеспечить выполнение требований безопасности при эксплуатации батареи.

Статья подготовлена по результатам работ, проведённых при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № ДН01/0001/216/15 между ООО «ЛиАЗ» и ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бутарович Д. О. Метод разработки энергоэффективного закона управления электробусом при движении по городскому маршруту / Д. О. Бутарович, Б. Б. Косицын, Г. О. Котиев // Труды НАМИ. — 2017. — № 2 (269). — С. 16–27.
2. Румянцев А. М. Поведение малогабаритных литийионных аккумуляторов в условиях перезаряда / А. М. Румянцев, Е. Г. Волжинская, В. В. Жданов // Электрохимическая энергетика. — 2007. — Т. 7. — № 2. — С. 73–77.
3. Груздев А. И. Методические подходы к оценке степени заряженности литийионных аккумуляторных батарей // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2015. — Т. 149. — № 6. — С. 39–43.
4. Online state of health estimation on NMC cells based on predictive analytics / M. Berecibar, F. Devriendt, M. Dubarry et al. // Journal of Power Sources. — 2016. — № 320. — P. 239–250.
5. Щербин А. М. Современные бортовые информационно-управляющие системы автомобильной техники // Журнал автомобильных инженеров. — 2015. — № 3 (92). — С. 26–29.
6. Козлов А. Н. Организация безопасной эксплуатации тяговой литийионной аккумуляторной батареи на транспортном средстве // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2016. — № 1 (44). — С. 14–19.
7. Проблема мониторинга и балансировки аккумуляторных батарей транспортных средств / А. П. Иншаков, Ю. Б. Федотов, С. С. Десяев и др. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. — 2017. — № 2. — С. 12–18.
8. Варламов Д. О. Обзор активных устройств балансировки, предназначенных для тяговых аккумуляторных батарей в электрическом транспорте / Д. О. Варламов, А. А. Скворцов, В. П. Хортов // Журнал автомобильных инженеров. — 2016. — № 4 (99). — С. 21–23.