

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 5. С. 83–86
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(5):83-86

УДК 614.83

Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2

Александр Сергеевич Харламенков ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Представлены требования нормативных документов по реализации безопасной эксплуатации литий-ионных аккумуляторов и аккумуляторных батарей. Проведено обобщение современных способов обеспечения защиты литий-ионных аккумуляторов. Рассмотрены внешние системы защиты ячеек и аккумуляторных блоков для предупреждения и устранения аварийных и пожароопасных режимов работы. Дано описание принципов работы защитных устройств и примеры их реализации на практике. Показаны примеры реализации внешних электронных систем защиты в виде отдельных печатных плат (*BMS*) и неэлектронных — в виде различных систем охлаждения (*BTMS*) и плавких предохранителей.

Ключевые слова: балансир; резистор; катушка индуктивности; конденсатор; электрический ток; напряжение; теплопроводность; температура; короткое замыкание

Для цитирования: Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 83–86.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 2

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The requirements of regulatory documents for the implementation of the safe operation of lithium-ion batteries and storage batteries are presented. A generalization of modern methods for ensuring the protection of lithium-ion batteries has been carried out. External systems for protecting cells and battery packs for the prevention and elimination of emergency and fire hazardous modes of operation are considered. A description of the principles of operation of protective devices and examples of their implementation in practice is given. Examples of the implementation of external electronic protection systems in the form of separate printed circuit boards (*BMS*) and non-electronic ones — in the form of various cooling systems (*BTMS*) and fuses are shown.

Keywords: balancer; resistor; inductor; capacitor; electric current; voltage; thermal conductivity; temperature; short circuit

For citation: Kharlamenkov A.S. Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 2. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):83-86. (rus).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru

ВОПРОС

В предыдущей рубрике «Вопрос – ответ» журнала № 4 за 2022 г. [1] были рассмотрены различные варианты систем защиты от аварийных режимов работы единичных элементов питания (ячеек) на примере цилиндрического литий-ионного аккумулятора марки 18650.

По результатам анализа и обобщения информации было отмечено, что в качестве внутренней системы защиты аккумуляторной ячейки могут выступать:

- основная система — устройства *PTC* (терморезистор) и *CID* (устройство прерывания тока с предохранительным клапаном). Устанавливаются со стороны положительной клеммы аккумулятора и достаточно эффективно справляются с задачей предотвращения саморазгона аккумулятора, его вздутия, взрыва;
- дополнительная система — электронная система защиты в виде платы *PCB* с или без предохранительного клапана. Размещается со стороны отрицательной клеммы аккумулятора и повышает безопасность его эксплуатации.

В случае применения аккумуляторных сборок (пакетов, блоков) требуются иные способы защиты, снижающие возникновение пожаровзрывоопасных случаев в процессе зарядки/разрядки. Такие системы защиты можно условно отнести к внешним, расположенным вне корпуса единичного элемента питания. Какие варианты внешних систем защиты применяют на сегодняшний день в аккумуляторных сборках?

ОТВЕТ

Следует отметить, что системы защиты, представленные в рубрике «Вопрос – ответ» журнала № 4 за 2022 г. [1], характерны для большинства различных моделей аккумуляторов. Практически у всех современных марок в качестве основной защиты применяются разрывные мембраны (см. рис. 1). Они не всегда снабжаются дополнительными устройствами в виде терморезисторов (*PTC*) и устройств прерывания тока (*CID*). Выполнение данных защитных функций в этих случаях возлагают на внешние электронные системы.

ГОСТ Р МЭК 62619–2020¹ требует обязательного наличия систем защиты, способных выполнять контроль предельных напряжений каждого отдельного аккумулятора или блока аккумуляторов. Эти системы могут дополняться дополнительными модулями.

Для реализации данного требования в аккумуляторных сборках, состоящих из 2-х и более элементов, используют внешние системы контроля батареи (*Battery Management System* или *BMS*). Эта система представляет собой печатную плату, подобную платам *PCB*, но с большим набором элементов и функционала. Плата *BMS* может осуществлять: контроль напряжения и температуры отдельных ячеек, световую индикацию их состояния; отключение цепи при глубоком разряде или перезаряде отдельного элемента; вывод или передачу данных о состоянии каждой ячейки на внешние устройства (подключаемый дисплей или посредством устройства *Bluetooth*). Состав и набор функционала зависит от цены, количества ячеек и конечных реализуемых задач.

Важным элементом системы контроля является балансир — встроенное в *BMS* плату или реализованное отдельно устройство, обеспечивающее равномерное распределение напряжения на всех аккумуляторных ячейках, ограничиваю-

щее чрезмерный заряд одних и разряд других элементов питания. Балансир позволяет обеспечить равномерный износ всех аккумуляторных ячеек и продлить общий срок службы батареи в целом при условии, что допустимое количество циклов балансировки не будет превышать определенного значения [2].

Балансиры разделяют на пассивные и активные. Пассивные балансиры (на стабилитронах) работают только в конечной фазе зарядки аккумуляторного блока, постепенно отключая отдельные ячейки, напряжение на которых достигло верхнего предела. Характеризуются малыми зарядными токами и значительным тепловыделением, которое не позволяет размещать балансирующую плату во внутреннем объеме аккумуляторного блока и требует дополнительной системы охлаждения, увеличивающей габаритные размеры всей системы. Для снижения тепловыделения применяют балансиры с шунтирующими резисторами, которые имеют меньшие размеры и могут устанавливаться непосредственно в основной корпус батареи (см. рис. 2).

Активные балансиры позволяют оперировать большими токами и обеспечивать равномерное перераспределение заряда от более к менее заряженным аккумуляторам не только во время заряда, но и в процессе разряда и хранения аккумуляторной сборки. Реализуются в виде отдельных плат с или без световой индикации.

Активные балансиры разделяются на индуктивные и емкостные (см. рис. 3). Индуктивный балансир использует катушки индуктивности (дроссели) в качестве промежуточных накопителей. Характеризуется потреблением меньших токов балансировки (1–1,5 А), чем у емкостных балансиров (5 А). Применяется для балансировки стандартных литий-ионных батарей (*Li-ion* и *Li-Pol*) и обычно имеет дополнительный блок управления «спящим режимом» для снижения потерь энергии в период, когда балансировка закончена.

Емкостные балансиры используют для выравнивания потенциалов ячеек конденсаторы и считают более универсальными, подходящими для работы с большинством типов аккумуляторов (преимущественно *LiFePO₄* и *LTO*).

Следует понимать, что наличие или отсутствие в системах защиты балансирующих схем не влияет на пожаровзрывобезопасность самих аккумуляторов. Как уже упоминалось выше, за безопасность ячеек и блоков в целом

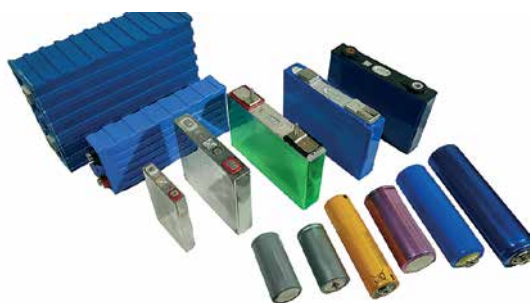


Рис. 1. Типы различных литиевых аккумуляторов с наличием предохранительных клапанов

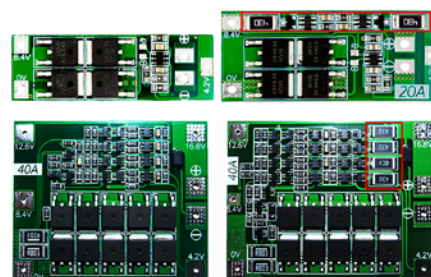


Рис. 2. Варианты изготовления плат *BMS* для реализации системы защиты литиевых аккумуляторов (красной рамкой обозначены платы с пассивными балансирами на резисторах)

¹ ГОСТ Р МЭК 62619–2020. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие неокислотные электролиты. Требования безопасности для литиевых аккумуляторов и батарей для промышленных применений: введен в действие 01.08.2020. М. : Стандартинформ, 2020.

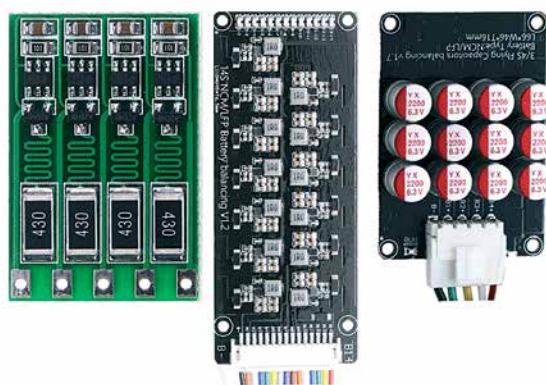


Рис. 3. Примеры выполнения балансиров на самостоятельных печатных платах (слева направо: резистивный, индуктивный, емкостный)

отвечают внутренние PCB- и внешние BMS-устройства. Функции последних частично выполняют и зарядные устройства (ЗУ), которые снабжены схемами управления зарядным током и напряжением, контроллерами температуры всего блока и каждой ячейки в отдельности, а также счетчиками ампер-часов, оценивающими заряженность батареи. Для безопасной и качественной зарядки литий-ионных аккумуляторов используют двухэтапную зарядку по схеме CC-CV (постоянная сила зарядного тока – постоянное напряжение). Для полной зарядки литий-ионного аккумулятора требуется сначала подавать постоянный зарядный ток с плавным повышением напряжения до верхнего предела, не допускающего перенапряжения, а далее при постоянном напряжении снизить зарядный ток до предела, не допускающего перезаряда аккумулятора (см. рис. 4).

Для качественного и безопасного заряда батарей большой емкости, получающих питание от генератора (в автомобилях, речном транспорте и др.), применяются так называемые DC-DC устройства – преобразователи постоянного напряжения генератора, которые обеспечивают контроль и изменение напряжений и токов по мере зарядки батареи аналогично схеме CC-CV.

Вышепредставленные варианты контроля состояния литий-ионных аккумуляторов относятся к внешней электронной системе защиты, размещаемой в корпусе блока с ячейками. При этом следует понимать, что сам корпус аккумуляторного блока также позволяет снизить риск возникновения пожаровзрывоопасной ситуации за счет его конструктивных особенностей.

Известно, что на нормальное состояние аккумуляторов негативно влияют различные вибрации и механические удары, а также отсутствие должного охлаждения отдельных ячеек. Для аккумуляторных сборок это особенно актуально, так как многие производители не предусматривают никаких внешних неэлектронных систем защиты ячеек. Небольшие батареи, состоящие из 4–10 ячеек, могут вполне обойтись без таких систем, но для большего числа следует предусматривать следующие варианты защиты.

В первую очередь для защиты сборок может применяться механическое разделение отдельных ячеек с помощью

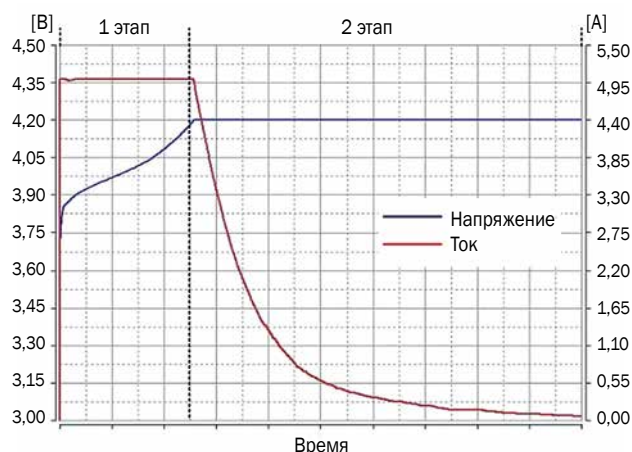


Рис. 4. Графики изменения напряжения и тока при двухэтапной зарядке литий-ионного аккумулятора

специальных посадочных гнезд (см. рис. 5, а). Они позволяют надежно зафиксировать каждую ячейку и обеспечить небольшие зазоры между соседними аккумуляторами, через которые более эффективно обеспечивается теплоотвод. Для устранения нежелательных вибраций и механических воздействий между ячейками размещаются прокладки из различных материалов, например листового стеклотекстолита (СТЭФ) толщиной 1 мм. Данный вариант обеспечивает надежную изоляцию соседних ячеек, что снижает вероятность распространения пожаровзрывоопасных воздействий между ними (см. рис. 5, б).

Кроме этого, существуют различные способы защиты аккумуляторных блоков от перегрева отдельных ячеек (*battery thermal management system – BTMS*): пассивное охлаждение с естественным теплоотводом через корпус; воздушное охлаждение с помощью вентиляторов; жидкостное охлаждение с помощью воды, гликолей и т.п.; системы терморегулирования за счет тепловых трубок или отдельных электронных устройств; гибридное охлаждение [3, 4].

Обоснование использования пассивных систем охлаждения во многом зависит от результатов анализа эффективности их применения с использованием методов экспериментального и компьютерного моделирования [5], которые позволяют получить оптимальные формы охлаждающих поверхностей с наличием или без дополнительных выступов (ребра). Для пассивных систем охлаждения разрабатываются новые способы теплоотвода за счет применения материалов PCM с изменяющимся фазовым состоянием (*Phase-Change Material*) [6]. Данные парафинсодержащие материалы при нагреве изменяют свое агрегатное состояние с твердого на жидкое, улучшая теплоотвод от корпуса аккумулятора. Имеют более низкую стоимость по сравнению с силиконовыми или графитовыми теплопроводящими пастами, высокую устойчивость к высыханию, а также не подвержены капиллярному и выдавливающему (*pump*) эффектам.

Наличие принудительной циркуляции воздуха через батарею с помощью вентиляторов увеличивает конечные габариты устройства, поэтому на практике, чаще всего прибегают к естественной конвекции воздуха между ячейками аккумуляторного блока или искусственной – при движении (в электросамокатах, электромобилях и т.п.).



Рис. 5. Варианты выполнения внешней неэлектронной защиты аккумуляторных блоков: *a* — объединение ячеек в аккумуляторный блок с помощью посадочных гнезд; *b* — отделение соседних ячеек друг от друга с помощью специальных прокладок

Новейшим и наиболее перспективным способом обеспечения эффективного теплообмена является применение прямого жидкостного охлаждения, называемого также иммерсионным [7]. В такой системе все ячейки аккумуляторного блока погружены в диэлектрическую жидкость (углеводородные и силиконовые масла, фторированные углеводороды и др.). Иммерсионное охлаждение обеспечивает лучшую однородность температуры каждой ячейки и всего блока по сравнению с другими методами охлаждения, что позволяет упростить конструкцию системы, обеспечить достаточную пожаровзрывобезопасность и снизить ее конечную стоимость.

В системах бесперебойного питания и электромобилях для защиты аккумуляторного блока или его части от короткого замыкания дополнительно применяются все известные плав-



Рис. 6. Примеры конструкции аккумуляторных блоков с установкой плавких предохранителей

кие предохранители, имеющие компактную форму и размеры для размещения на клеммах аккумуляторов (см. рис. 6). Представленные в статье технические решения позволяют обеспечить стабильность и долговечность работы литий-ионных аккумуляторов. В то же время используемые внутренние и внешние системы защиты, рассматриваемые в рамках реализации пожарной безопасности, можно считать частью системы предотвращения пожара. Эффективная и слаженная работа обеих систем значительно снижает риск возникновения пожара (взрыва) на объектах защиты, но не способна полностью устранить их пожаровзрывоопасность. Для этих целей требуется применение современных технических средств тушения и ограничения развития пожара, относящихся к системе противопожарной защиты, которые будут рассмотрены в следующем номере журнала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 76–79.
2. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Управление процессом заряда многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. Т. 21. № 3. С. 115–123. DOI: 10.21685/2307-5538-2017-3-16
3. Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L. et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards // Journal of Energy Chemistry. 2021. Vol. 59. Pp. 83–99. DOI: 10.1016/j.jechem.2020.10.017
4. Груздев А.И. Инновационные электрические накопители на базе литиевых источников тока для мобильных и стационарных применений // Инновации ГК Ростех. 2014. Т. 185. № 3. С. 112–120. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22768838>
5. Слабоспицкий Р.П., Хажмурадов М.А., Лукьянова В.П. Анализ перспективных систем охлаждения аккумуляторных батарей // Радиоэлектроника и информатика. 2013. Т. 61. № 2. С. 8–12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-sistem-ohlazhdeniya-akkumulyatornyh-batarey>
6. Patel J.R., Rathod M.K. Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. 2020. Vol. 480. P. 228820. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228820
7. Roe C., Feng X., White G. et al. Immersion cooling for lithium-ion batteries — A review // Journal of Power Sources. 2022. Vol. 525. P. 231094. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.231094

Материал поступил в редакцию 01.10.2022

Received October 1, 2022

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ПИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Boris Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru