

Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1

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 аккумуляторов и аккумуляторных батарей. Проведено обобщение современных способов обеспечения защиты литий-ионных аккумуляторов. Рассмотрены различные системы защиты единичных элементов питания для предупреждения и устранения аварийных режимов работы. Дано описание принципов работы защитных устройств и примеры их реализации на практике. Показан принцип электронной системы защиты в виде небольших печатных плат, встроенных в корпус аккумулятора.

Ключевые слова: тепловой разгон; короткое замыкание; горючие газы; взрыв; печатная плата; пожарная опасность

Для цитирования: 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.

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

Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 1

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 on the implementation of the safe operation of batteries and rechargeable batteries are presented. A generalization of modern methods for ensuring the protection of lithium-ion batteries was carried out. Various systems of protection of single batteries for the prevention and elimination of emergency modes of operation are considered. A description of the principles of operation of protective devices and examples of their implementation in practice is given. The principle of operation of the electronic protection system in the form of small printed circuit boards built into the battery case is shown.

Keywords: thermal acceleration; short circuit; combustible gases; printed circuit board; fire hazard

For citation: Kharlamenkov A.S. Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):76-79. (rus.).

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



ВОПРОС

В рубрике «Вопрос-ответ» журнала № 3 за 2022 г. [1] были представлены основные правила безопасности, снижающие вероятность возникновения пожара/взрыва при хранении и обслуживании литиевых аккумуляторов. Помимо указанных мер для обеспечения безопасной эксплуатации аккумуляторных батарей (далее АКБ) фирмы-производители используют различные инженерно-технические решения по предотвращению перехода АКБ в аварийное состояние с последующим воспламенением или взрывом.

В зависимости от варианта исполнения (одна батарея, пакет, батарейный блок) аккумуляторы снабжаются различными друг от друга системами защиты. Какие же технические способы и средства обеспечения безопасной эксплуатации литиевых АКБ применяются на сегодняшний день?

ОТВЕТ

В ГОСТ Р МЭК 62619–2020¹ указано, что неправильное использование аккумуляторов допускается. При этом они не должны представлять значительную опасность, а именно:

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.

- воспламенение;
- взрыв;
- критическое электрическое короткое замыкание из-за утечки из аккумулятора электролита;
- выброс, который непрерывно выпускает легко воспламеняющиеся газы;
- разрыв корпуса аккумулятора с выходом его внутренних компонентов.

Конструкция АКБ не должна допускать аномального повышения температуры и обеспечивать функцию сброса давления, которая исключает разрыв корпуса или взрыв. Для исключения и предотвращения указанных аварийных состояний литий-ионных аккумуляторов применяются различные системы защиты.

Все способы защиты литиевых АКБ можно условно разделить на внутренние/внешние и электронные/неэлектронные (без использования печатных плат с микропроцессорами).

Внутренняя защита реализуется для единичного элемента и направлена на предотвращение его перегрева, саморазгона, вздутия и взрыва. Поддержание нормальной работы литий-ионного аккумулятора в процессе его зарядки/разрядки обеспечивает сепаратор — мембрана из пористого полипропилена, ограничивающая движение ионов от одного электрода к другому. В случае излишнего нагрева электролита батареи, мембрана способна практически полностью заблокировать движение ионов, тем самым останавливая химическую реакцию и перегрев корпуса аккумулятора. В отдельных случаях при значительном нагреве электролита возможно плавление сепаратора и его пробой, что приводит к аварийному режиму работы литий-ионного аккумулятора с запуском реакции «саморазгона».

Защита аккумулятора от перегрева может быть реализована с помощью дополнительного полимерного слоя, наносимого между катодом и токосъемником [2]. Этот полимер способен изменять электропроводность в зависимости от напряжения, действуя как химический выключатель. При напряжении на ячейке более 4,2 В увеличивает сопротивление электрода более чем в 20 раз, а во время перезарядки при напряжении 5 В позволяет осуществить обратимый процесс заряда/разряда без развития побочных процессов.

Со стороны положительной клеммы наиболее распространенных цилиндрических аккумуляторов марки 18650 устанавливается система защиты (см. рис. 1). Она включает в себя: защиту от нагрева АКБ в результате короткого замыкания или больших зарядных токов (PTC); защиту от вздутия (разрыва) корпуса аккумулятора при повышении давления за счет перегрева электролита с переходом его в газообразное состояние (CID).

Аббревиатура «PTC» расшифровывается как «устройство с положительным температурным коэффициентом» — терморезистор в виде шайбы, увеличивающий свое



Рис. 1. Система защиты цилиндрических литий-ионных аккумуляторов

внутреннее сопротивление при повышении величины зарядного тока, протекающего через положительную клемму. Данная защита устанавливается в аккумуляторы далеко не всеми фирмами-производителями.

Устройство представляет собой несколько слоев из металлических токопроводящих колец (толщиной около 40 мкм) и полимерного заполнителя (толщиной около 240 мкм). Последний выполнен из полиэтилена, смешанного с проводящими частицами, который в нормальных условиях обладает низким сопротивлением (20–50 мОм). Чрезмерный ток приводит к излишнему нагреву полимерного слоя. При достижении температуры более 100 °С полиэтилен начинает расширяться и тем самым увеличивать расстояние между проводящими металлическими шайбами и частицами, что приводит к повышению сопротивления шайбы (более 150 Ом при температуре 104 °С) [3]. Этим способом ограничивается величина зарядного тока и чрезмерный нагрев аккумулятора.

PTC принято считать обратимым (самовосстанавливающимся) устройством, которое при уменьшении зарядного тока и снижения температуры клеммы восстанавливает свое исходное сопротивление. В случаях частых перегревов терморезистор PTC снижает свою проводимость почти в 2 раза без возможности восстановления, что ведет к невозможности дальнейшей эксплуатации аккумулятора.

Аббревиатура «CID» расшифровывается как «устройство прерывания тока» — подвижный контакт, отключающий подачу напряжения на положительную клемму в случае перегрева АКБ и воздействия на подвижную мембрану (предохранительный клапан) избыточного давления с выделением газа из корпуса аккумулятора. Клапан располагается на стороне положительного контакта аккумулятора. Перегрев аккумулятора с выделением газообразного электролита возможен при внутреннем или внешнем коротком замыкании, а также в результате превышения номинальной величины зарядного тока.

Устройство CID состоит из трех основных элементов (см. рис. 2). К ним относятся два диска (верхний и нижний), а также слой изолятора.

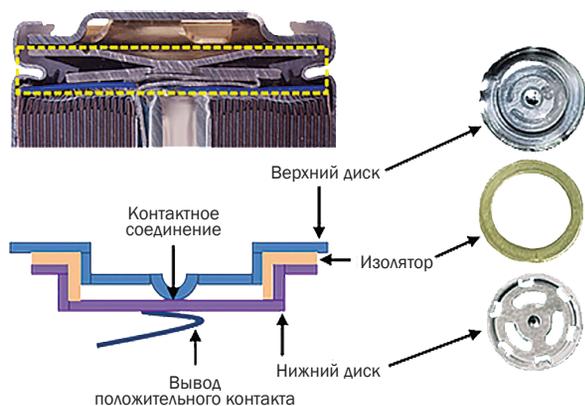


Рис. 2. Общий вид и схема устройства прерывания тока «CID»

Между дисками имеется точечное соединение, расположенное в центральной части (см. рис. 3, а). Именно через это соединение протекает зарядный ток. В случае перегрева аккумулятора часть электролита переходит в газообразное состояние. Газы воздействуют на верхний диск (клапан), который, поднимаясь вверх, разрывает точечное соединение с нижним диском (см. рис. 3, б). Так прерывается процесс зарядки аккумулятора.

Следует понимать, что после обесточивания аккумулятора процесс газообразования прекращается не сразу, так как электролит еще долго находится в нагретом состоянии. Поэтому возникает необходимость сброса избыточного давления для предотвращения вздутия и разрыва корпуса АКБ. Для этой цели в предохранительном клапане CID имеются специальные «С»- или «Х»-образные насечки, по которым происходит его разрыв с выбросом газообразного электролита в окружающую среду через вентиляционные отверстия положительной клеммы (см. рис. 3, с). Для разрыва верхнего диска CID в местах насечек по разным данным требуется давление, превышающее 2,2–2,5 МПа [3].

Устройство CID чаще всего является необратимым, так как при разрыве точечного контакта или предохранительного клапана в местах нанесения специальных насечек аккумулятор далее невозможно эксплуатировать (кроме отдельных случаев).

У некоторых моделей аккумуляторов имеется дополнительная защита со стороны отрицательной клеммы, представляющая собой предохранительный клапан, который



Рис. 3. Принцип действия устройства прерывания тока «CID»: а – нормальный режим работы; б – отключение питания положительной клеммы аккумулятора; с – выброс газообразного электролита через вентиляционные отверстия с разрывом насечек предохранительного клапана

вскрывается и осуществляет сброс накопленных газов при давлении более 2,5 МПа.

Для эффективного срабатывания устройства CID требуется постоянная разработка новых и совершенствованные старых конструкций предохранительного клапана, а также вентиляционных каналов для отвода газа. Как показало исследование [4], отдельные конструкции аккумуляторов имеют значительные задержки по времени вскрытия клапана, что приводит к повреждению стенок корпуса АКБ. Применяемые в проектной практике программные продукты позволяют подобрать оптимальные размеры и форму вентиляционных отверстий и разрывных насечек системы защиты литий-ионных аккумуляторов, тем самым снижая вероятность возникновения аварийной ситуации.

Со стороны отрицательной клеммы аккумулятора может быть установлена электронная защита, которая представляет собой небольшую печатную плату (PCB или PCM), обеспечивая защиту АКБ от перегрузки, короткого замыкания, перезаряда и глубокого разряда. Часто данный элемент защиты называют контроллером, что не совсем корректно, так как данный модуль защиты не устанавливает зарядный ток, не контролирует температурные режимы работы и не отключает батарею при ее полной зарядке. Такие контроллеры применяются на практике, но располагаются не в АКБ, а в зарядном устройстве.

Вне зависимости от форм-фактора плата PCB включает в себя практически одинаковый набор элементов (см. рис. 4). Наиболее распространенная внутренняя электронная защита аккумулятора реализуется с применением интегральной микросхемы DW01 [5] и двух полевых транзисторов с изолированными затворами (MOSFET или МОП-транзисторы), выполняющих в схеме роль ключей. Один из них обеспечивает защиту от глубокого разряда (менее 2,5–2,7 В), второй – от перезаряда (выше 4,1–4,3 В). На рис. 4 оба МОП-транзистора расположены в одном корпусе с 8 выводами (8205А). Защита от перегрузки по току осуществляется за счет измерения падения напряжения на полевых транзисторах, где их переходное сопротивление выступает в роли измерительного шунта.

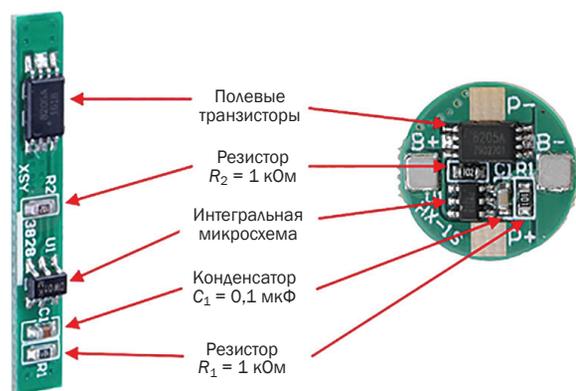


Рис. 4. Общий вид внутренней электронной защиты литий-ионных аккумуляторов

Таким образом, к основной внутренней системе защиты следует относить устройства *PTC* и *CID*, которые достаточно эффективно справляются с задачей предотвращения саморазгона аккумулятора, его вздутия, взрыва. Применение предохранительного клапана и электронной системы защиты в виде платы *PCB*, установленных со стороны отрицательной клеммы АКБ, следует считать дополнительной мерой, повышающей безопасность эксплуатации единичного аккумуляторного элемента. Оба устройства (*PTC* и *CID*), работая совместно, предупреждают развитие аварийных ситуации при повседневной эксплуатации АКБ.

В то же время отмечались случаи отказа представленных выше систем защиты по причине дефектов в конструкции устройств, загрязнения вентиляционных отверстий, некачественного нанесения насечек на предохранительный клапан и т.д. В целом устройства *PTC* и *CID* считаются эффективными для защиты единичного аккумуляторного элемента, но не всегда срабатывают в составе аккумуляторных сборок с *n*-м количеством аккумуляторов (пакеты, блоки), где требуются иные — внешние системы защиты, которые будут рассмотрены в следующем номере журнала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 96–102.
2. Beletskii E.V., Kal'nin A.Y., Luk'yanov D.A., Kamenskii M.A., Anishchenko D.V., Levin O.V. A polymer layer of switchable resistance for the overcharge protection of lithium-ion batteries // Russian Journal of Electrochemistry. 2021. Vol. 57. Issue 10. Pp. 1028–1036. DOI: 10.1134/S1023193521100050
3. Xu B., Kong L., Wen G., Pecht M.G. Protection devices in commercial 18650 lithium-ion batteries // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 66687–66695. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3075972
4. Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L., Liu J., Li Y. 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
5. Бурцев А.П., Кочергин О.Б. Повышение надежности схемы от короткого замыкания и перегрузки аккумуляторных банок типа LI-ION // Будущее науки — 2021 : сб. науч. ст. 9-й Междунар. молодежной науч. конф. : в 6- т. Курск, 2021. Т. 3. С. 222–225.

Материал поступил в редакцию 01.08.2022

Received August 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; РИНЦ 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, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru