

Способы заряда Li-ion аккумуляторов и батарей на их основе

Александр РУМЯНЦЕВ, к. х. н.
rumyantsev.amr@gmail.com
Алексей РЫКОВАНОВ
rycovanalex@yandex.ru

Как и любая электрохимическая система, литий-ионные аккумуляторы имеют свои особенности эксплуатации. Их применение не только в готовых, но и во вновь создаваемых изделиях ставит перед разработчиками широкий круг вопросов. Один из них — способы заряда.

В данной статье мы не будем касаться самих электрохимических процессов, протекающих в Li-ion аккумуляторе, а рассмотрим все с точки зрения конечного пользователя. Для потребителя и разработчика электроники любой аккумулятор выглядит как некий двухполюсник, имеющий два контакта, выходящих из корпуса. Такой элемент схемы имеет ряд числовых характеристик, графиков зависимости и т. д., и практически ничем не отличается по количеству приводимых в документацию параметров от, например, диода. С этой точки зрения мы и будем рассматривать способы заряда этих устройств.

Литий-ионные аккумуляторы производят как в корпусном (например, типоразмера 18650), так и в ламинированном исполнении (гель-полимерные), электроды и электродные массы которых помещены в герметичный пакет из специальной пленки. Электрохимические процессы протекают одинаково как в тех, так и в других, и все, сказанное ниже, в равной степени относит-

ся ко всем аккумуляторам вне зависимости от их исполнения.

Сразу отметим, что классический способ заряда Li-ion аккумулятора делится на два этапа. Первый — это заряд постоянным током, второй — заряд при постоянном напряжении (рис. 1).

На рис. 1 можно увидеть этап 1'. Он необходим, когда напряжение на аккумуляторе ниже некоторого установленного значения (например, 2,5 В). При долгом хранении аккумулятора вследствие саморазряда и/или потребления системы обеспечения функционирования (СОФ) напряжение на аккумуляторе может упасть ниже, к примеру, 2,5 В (СОФ входит в состав аккумуляторной батареи, даже если она состоит из одного аккумулятора). Малый ток заряда обеспечивает постепенный выход активных электродных материалов на заданные уровни напряжения, при которых они штатно функционируют (например, при более 2,8 В), после чего включается основной ток заряда. Данный режим призван обеспечить более долгую жизнь

аккумулятора при выходе его из заданного диапазона напряжений. Также этап 1' применяется при заряде аккумулятора при низких температурах, например ниже +5 °С — для «разогрева» электродных масс.

Первоначальный заряд малым током используется и для обеспечения безопасности аккумулятора при заряде. Если внутри аккумулятора произошло микрокороткое замыкание (или просто КЗ), то по истечении некоторого времени заряда напряжение на нем не будет возрастать. Этот факт может свидетельствовать о неисправности. Если начать заряд достаточно большим током сразу, то при КЗ может произойти сильный разогрев аккумулятора и его разгерметизация. Хотя СОФ имеет температурный датчик, при быстром заряде и относительно большой теплоемкости аккумулятора и высоком конечном значении теплопроводности разгерметизация может произойти немного раньше, чем СОФ отключит аккумуляторы от заряда. Функция заряда малым током часто возлагается не на зарядное устройство, а на СОФ батареи. В схеме СОФ это может быть дополнительный MOSFET (управляющий зарядом), включенный через последовательный резистор, ограничивающий ток, подключенный к аккумуляторной батарее (АБ). Необходимо отметить, что данный этап часто исключают из цикла заряда батареи, начиная заряд сразу с этапа 1.

На первом этапе заряд осуществляется номинальным током, который измеряется в долях от номинальной емкости аккумулятора (Сн). Например, емкость аккумулятора 10 А·ч, номинальный ток заряда 0,2Сн, то есть 2 А — пятичасовой режим заряда. Понятно, что потребитель хочет, чтобы заряд осуществлялся как можно быстрее — в течение 1–2 ч, что соответствует 0,5–1Сн. Такой режим заряда обычно называют ускоренным. Для нормальной работы аккумулятора номинальный ток заряда лежит в пределах 0,2–0,5Сн, а ускоренный, как уже говорилось, — в диапазоне 0,5–1Сн. Каким

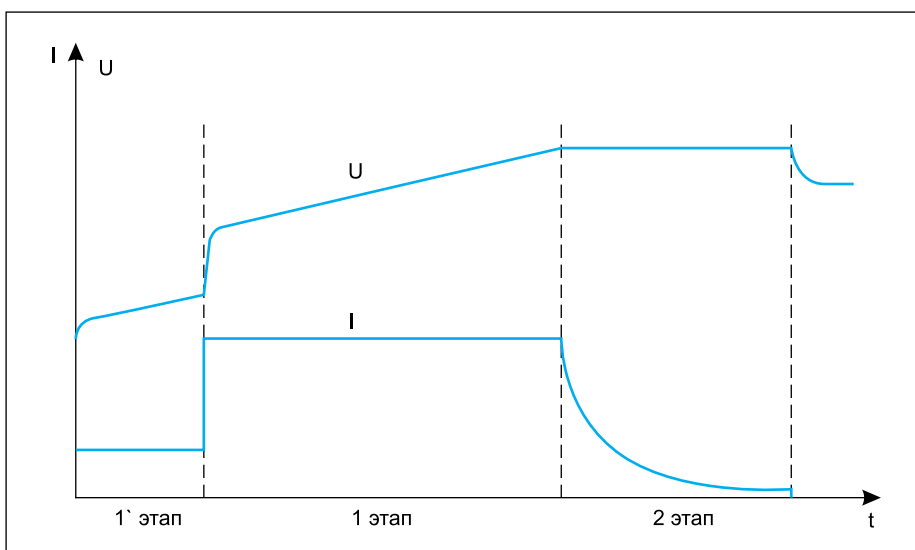


Рис. 1. Этапы заряда Li-ion аккумулятора: I — ток; U — напряжение; t — время

максимальным током можно заряжать тот или иной аккумулятор, можно узнать в документации на конкретный тип устройства. График роста напряжения на аккумуляторе, показанный на рис. 1, носит линейный характер (для простоты восприятия).

Чем выше ток заряда (или меньше время, отводимое на полный заряд), тем меньше аккумулятор «наберет» емкости и тем пристальнее необходимо следить за разогревом, чтобы его температура не вышла за установленный предел. При большом токе заряда существенно продлевается время 2-го этапа (рис. 1), когда ток постепенно падает до определенного предела. Так, например, при токе заряда 1Сн и отводимом на заряд времени в 1 ч аккумулятор достигнет своего конечного напряжения за 45–50 мин. Любой аккумулятор имеет внутреннее сопротивление (включающее в себя несколько составляющих — омическую, диффузионную и т. д.). Падение напряжения на внутреннем сопротивлении при большом токе заряда приведет к более быстрому достижению конечного зарядного напряжения. При достижении конечного напряжения заряд перейдет ко второму этапу — падающему току при постоянном напряжении. За оставшееся время 10–15 мин. аккумулятор «наберет» еще 0,1–0,15Сн, что в сумме составит не более 0,85–0,95Сн. При более коротком режиме заряда и лимите времени зарядная емкость будет еще меньше. Можно учитывать внутреннее сопротивление аккумулятора и ввести зависимость конечного зарядного напряжения от тока заряда, но это требует проработки для конкретного типа аккумуляторов и более сложных зарядных устройств. Обычно разработчики не используют данные зависимости при проектировании простых устройств.

Ускоренный и номинальный режим заряда необходимо чередовать, особенно при заряде батарей, состоящих из нескольких последовательно соединенных аккумуляторов. При номинальном токе заряда возрастает его продолжительность. Увеличение времени заряда способствует лучшей балансировке аккумуляторов в батарее [1]. Чем больше время такой балансировки, тем лучше будут сбалансированы аккумуляторы по емкости и, в конечном итоге, батарея отдаст емкость, близкую к номинальной при разряде. Обычно системы баланса делаются пассивными, и работают они только при заряде батареи. Заряд номинальным режимом особенно рекомендуется после длительного хранения батареи, когда степень заряженности отдельных аккумуляторов будет сильно зависеть от токов саморазряда, который у разных аккумуляторов разный, даже при специально подобранных аккумуляторах в одной батарее.

Второй этап — заряд при постоянном напряжении и падающем токе. Ток на этом этапе падает до определенного значения. Например, процесс считается законченным при установлении тока заряда менее

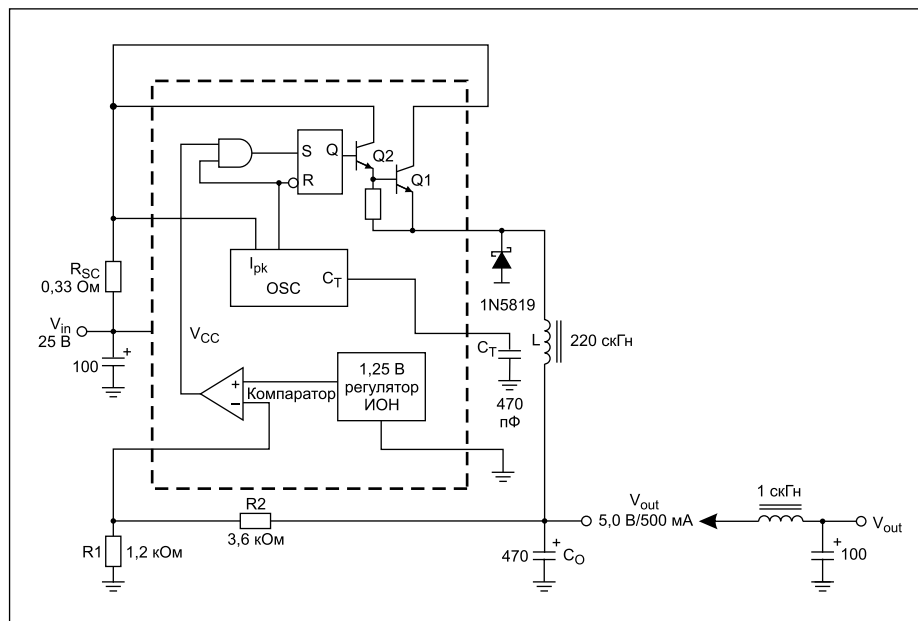


Рис. 2. Структурная схема MC34063, реализующая алгоритм заряда Li-ion аккумулятора

0,1–0,05Сн (в нашем примере <math>< 100 \text{ mA}</math>). Как было показано выше, продолжительность фазы падающего тока зависит от тока заряда. Для номинального режима заряда (0,2Сн) она длится обычно не более нескольких десятков минут, при этом аккумулятор набирает до 0,1–0,15Сн. Время заряда падающим током также зависит от степени деградации аккумулятора в процессе эксплуатации (иначе говоря, от срока службы и количества циклов заряд/разряд). Чем больше деградация, тем длиннее фаза падающего тока.

После окончания заряда напряжение на аккумуляторе падает на 0,05–0,1 В (рис. 1), приходя к своему равновесному состоянию. Держать аккумулятор продолжительное время (десятки часов) при конечном напряжении (например, 4,2–4,3 В) не рекомендуется из-за несколько повышенной в этом состоянии скорости деградации электродных масс. Поэтому после фазы падающего тока желательно прекратить заряд.

Производители электроники предоставляют уже готовые схемотехнические решения, реализующие описанный выше алгоритм заряда, выполненные в одном корпусе микросхемы — например MAX1551, MAX745 и т. д. Одна из популярных микросхем, применяемых для заряда Li-ion аккумуляторов (мобильных телефонов, фототехники и т. д.) от сети постоянного тока 12–24 В, — MC34063 (рис. 2). На рис. 2 выходное напряжение MC34063 — 5 В, но его можно пересчитать на конечное зарядное напряжение аккумулятора 4,1–4,3 В, варьируя резисторами R1, R2. Дополнительный выходной фильтр для уменьшения пульсаций можно исключить.

Часто возникает желание осуществлять заряд устройством, на выходе которого есть только постоянный ток (без фазы постоянного напряжения в конце заряда). Это позво-

ляют сделать, к примеру, зарядные устройства от никель-кадмиевых аккумуляторных батарей. Рассмотрим этот способ.

Необходимо отметить, что литий-ионная аккумуляторная батарея подключается через СОФ к зарядному устройству (ЗУ), имеющему внутренние ключи (для батарей небольшой емкости до 40–60 А·ч это обычно MOSFET). Поэтому прежде, чем подключать ЗУ к АБ, необходимо убедиться, что выходное напряжение ЗУ (напряжение разомкнутой выходной цепи) не слишком высокое, чтобы не вывести из строя коммутаторы заряда АБ. Сам алгоритм заряда можно осуществить с помощью постоянного тока (этап 1) и фазы импульсов (этап 2), показанной на рис. 3. Фаза импульсов заменяет фазу падающего тока (также этап 2), показанную на рис. 1.

Критерием остановки заряда могут служить напряжение на аккумуляторе или время импульса тока ($T_{\text{имп}}$), за которое напряжение на аккумуляторе достигает конечного зарядного напряжения (например, 4,2 В). При каждом импульсе напряжение на аккумуляторе будет повышаться, как показано на рис. 3. Как только оно достигнет уровня полностью заряженного аккумулятора с фазой падающего тока (рис. 1, примерно 4,1–4,15 В), заряд можно прекращать. Измерение напряжения на аккумуляторе необходимо производить через некоторое время после завершения зарядного импульса. Этот критерий окончания заряда при фазе импульсного тока Li-ion аккумулятора в большей степени справедлив для аккумуляторов на основе кобальтата лития (так называемые кобальтатные аккумуляторы). Об отличительных особенностях этих типов аккумуляторов мы поговорим далее.

Если ориентироваться на $T_{\text{имп}}$, то как только длительность импульса, в течение кото-

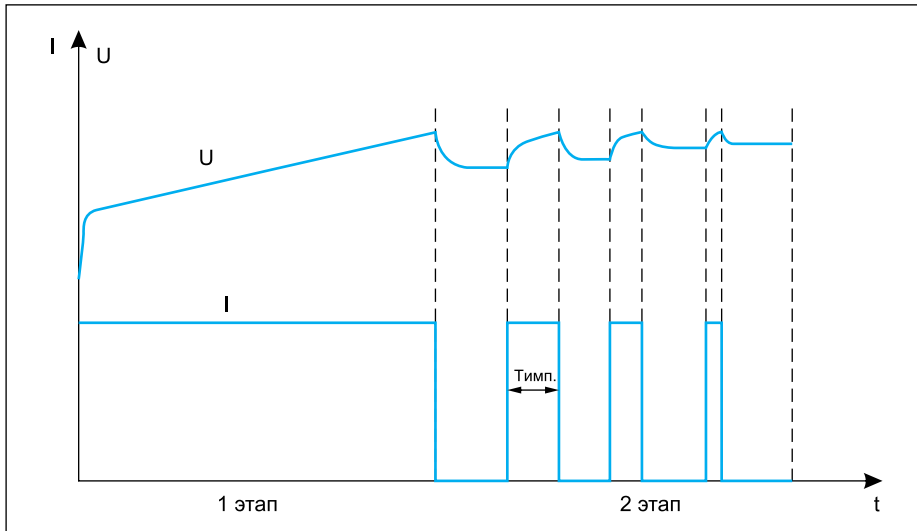


Рис. 3. Заряд постоянным током с прерывистой фазой зарядного тока: I — ток; U — напряжение; t — время

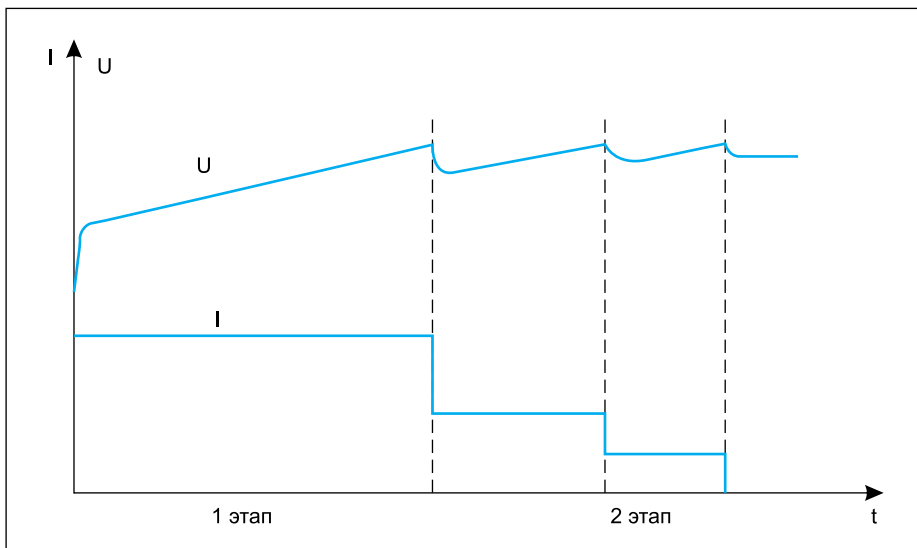


Рис. 4. Заряд ступенчатым током: I — ток; U — напряжение; t — время

четная длительность зарядного импульса составит порядка 30 с.

Реализацию данного алгоритма заряда можно возложить на СОФ АБ, если она спроектирована таким образом, что можно изменить алгоритм ее функционирования [2]. Тогда микроконтроллер СОФ может отслеживать напряжение на аккумуляторе или производить вычисления времени импульса и останавливать заряд, размыкая окончательно зарядный ключ.

Еще один способ — заряд ступенчатым током (рис. 4).

Для упрощения ЗУ обычно заряд осуществляют в два этапа: номинальный ток (этап 1) и ток вдвое меньше номинального. То есть существует всего две ступени заряда. На рис. 4 для наглядности показано три ступени. И действительно, если есть возможность уменьшать ток ЗУ дискретно не в два раза, а на меньшую величину, то заряд будет осуществляться почти так же, как показано на рис. 1, а на этапе 2 напряжение на аккумуляторе будет колебаться около конечного напряжения заряда.

Помимо аккумуляторов с катодом из кобальтата лития, в мире все большую популярность набирают железо-фосфатные аккумуляторы (литированный фосфат железа). Железо-фосфатные аккумуляторы хоть и имеют меньшие удельные характеристики ($\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$, $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{дм}^3$), но из-за меньшей стоимости (при той же емкости) становятся все более и более популярными. На рис. 5 представлены зарядные кривые двух типов аккумуляторов.

Заряд производился током $0,5\text{Сн}$. Из графиков видно, что аккумуляторы с положительным электродом на основе кобальтата лития имеют почти линейную характеристику роста напряжения от степени заряженности. Характеристика аккумуляторов с положительным электродом на основе литированного фосфата железа почти горизонтальна и только в конце заряда резко возрастает, а также существенно зависит от температуры. Конечное напряжение заряда у железо-фосфатных аккумуляторов обычно ниже и составляет $3,7\text{--}3,9\text{ В}$. После заряда (фазы падающего тока)

рого напряжение на аккумуляторе достигнет своего конечного значения, будет достаточно маленькой, заряд можно прекращать. Длительность можно считать маленькой,

если аккумулятор за это время наберет менее $0,2\text{--}1\%$ от своей емкости Сн . Например, при емкости аккумулятора $10\text{ А}\cdot\text{ч}$ — $0,5\%$ от Сн составит $0,05\text{ А}\cdot\text{ч}$. При токе заряда 5 А рас-

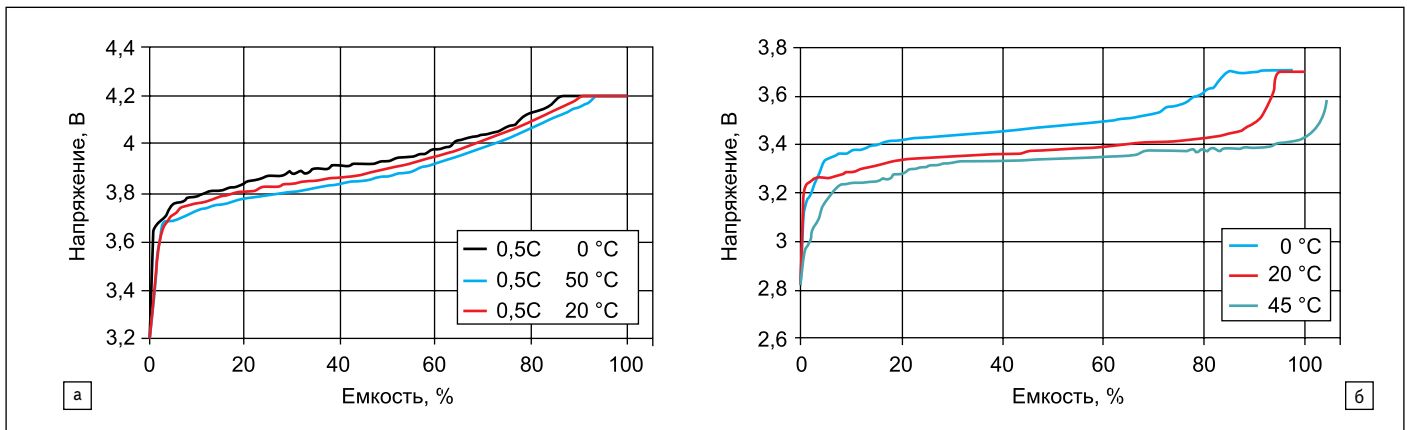


Рис. 5. Графики заряда при различных температурах аккумуляторов с материалом положительного электрода: а) кобальтат лития; б) литированный фосфат железа

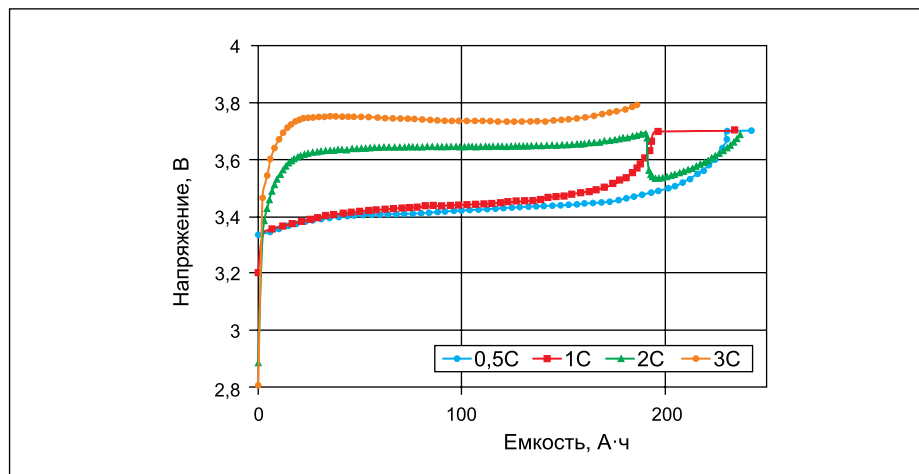


Рис. 6. Изменение напряжения литий-железо-фосфатного аккумулятора емкостью 240 А·ч в процессе заряда токами от 0,5 до 3Сн

напряжение даже у заряженного на 100% такого аккумулятора при нормальных условиях упадет до 3,35–3,45 В. Поэтому не будет наблюдаться такого роста напряжения, как показано на рис. 3, оно будет снижаться после каждого импульса заряда до указанного уровня (3,35–3,45 В). Критерием оценки заряженности аккумулятора в этом случае будет только $T_{имп}$, если заряд ведется прерывистой фазой тока (рис. 3).

Существуют Li-ion аккумуляторы с положительным электродом на основе никель-кобальт-алюминия и никель-кобальт-марганца. Зарядные зависимости у них ближе к зависимостям кобальтовых (рис. 5а). В любом случае при выборе и эксплуатации конкретного устройства необходимо внимательно ознакомиться с рекомендациями и документацией производителя. Заряд таких аккумуляторов также производится в два этапа.

Фаза постоянного напряжения (падающий ток) на рис. 5 отражена на представленных зависимостях в виде горизонтальной площадки в конце заряда. По величине этой площадки можно судить о емкости, набранной аккумулятором на этом этапе. Приведем экспериментальные данные заряда аккумулятора, иллюстрирующие способы, рассмотренные выше (рис. 6).

На рис. 6 представлены зарядные кривые аккумулятора емкостью 240 А·ч с положительным электродом на основе литированного фосфата железа. Зарядные зависимости нормированы относительно емкости аккумулятора, а не времени. Заряд осуществлялся токами 120 А (0,5Сн), 240 А (1Сн), 480 А (2Сн) и 720 А (3Сн) до напряжения 3,7 В (при токах 0,5, 1 и 2Сн) и до 3,8 В (при токе 3Сн), при нормальных климатических условиях и температуре +20 °С. На графике видно, что при токе заряда 0,5Сн фаза падающего тока (при постоянном напряжении) составляет 12–15 А·ч (плоская площадка в конце графика). При токе 1Сн это уже 35–40 А·ч.

При токе заряда 2Сн емкость составила всего около 190 А·ч при достигнутом напряжении 3,7 В, затем ток уменьшили в два раза (провал по напряжению), после чего аккумулятор еще зарядился на 35–40 А·ч. При токе заряда 3Сн напряжение отключения было повышено до 3,8 В, емкость составила всего около 180 А·ч, фаза падающего тока при постоянном напряжении отсутствует. На графике видно также, что при токе заряда 3Сн произошел некоторый провал по напряжению в середине кривой заряда. Это связано с повышением температуры аккумулятора и, как следствие, понижением внутреннего сопротивления (при повышении температуры возрастает скорость электрохимических реакций).

Выводы

Существует несколько способов заряда Li-ion аккумуляторов, но все они отражают сущность двухэтапного процесса: заряд постоянным и падающим током при постоянном напряжении. При заряде аккумуляторов или батарей током 0,5–1Сн и более фаза падающего тока обязательна для увеличения принятой аккумулятором зарядной емкости. При заряде током 0,1–0,3Сн фазой падающего тока можно пренебречь, так как за 3,5–10 ч заряда аккумулятор и так зарядится почти на всю емкость. ■

Литература

1. Рыкованов А. С. Системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая электроника. 2009. № 1.
2. Рыкованов А. С. Элементная база систем обеспечения функционирования Li-ion аккумуляторов // Компоненты и технологии. 2012. № 8.
3. Рыкованов А. С. Способы балансирования портативных железо-фосфатных Li-ion аккумуляторных батарей // Компоненты и технологии. 2012. № 10.