

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В СОСТАВЕ СОПТ

АЗГАМОВ М.Ф., ООО «ИЦ ЭнергоРазвитие», Казань

ВОРОШИЛОВ А.Н., ООО «Феникс», Москва

ПЕТРОВ А.Н., ООО «Азимут», Новосибирск

Продолжаем цикл статей, посвященных эксплуатации литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) в составе систем оперативного тока (СОПТ). Предыдущая статья [1] была посвящена экономическому анализу использования ЛИАБ. Объем статьи не позволил уделить достаточное внимание техническим особенностям ее эксплуатации в режиме поддерживающего заряда. Данная публикация представляет собой попытку устранить этот пробел. Ниже в качестве ЛИАБ рассматривается батарея, состоящая из литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), в качестве активного вещества которых используется литий-железо-фосфат. Одно из основных отличий ЛИА данного типа заключается в том, что эти аккумуляторы абсолютно безопасны в эксплуатации. Тем не менее, большинство озвученных ниже тезисов относятся и к другим типам ЛИА.

Ключевые слова: литий-ионная аккумуляторная батарея, система оперативного постоянного тока, технические особенности эксплуатации, режим поддерживающего заряда

Как уже было указано в предыдущих материалах, в основе функционирования литий-ионных аккумуляторов и свинцово-кислотных аккумуляторов (СКА) лежат разные по типу электрохимические реакции. Принципиальное отличие ЛИА от традиционных СКА – у них на границе электрод-электролит химическая реакция с преобразователем вещества электролита не происходит. На взгляд авторов, именно этот фактор обуславливает как ключевые преимущества ЛИА относительно СКА, так и их недостатки. Правильный учет этих факторов позволяет обеспечить длительную эксплуатацию ЛИАБ в режиме поддерживающего заряда, который характерен для ЛИАБ, входящих в состав СОПТ энергообъектов.

ПРЕИМУЩЕСТВА ЛИАБ ПО СРАВНЕНИЮ СО СКАБ

С точки зрения использования в составе СОПТ, ЛИА имеют нижеследующие преимущества.

При переходе к малым временам разряда (большим разрядным токам) у ЛИА доступная емкость практически не уменьшается

При разряде в течение 30 минут доступная емкость СКА становится меньше номинальной в два-три раза. Это обусловлено тем, что высокие токи разряда сопровождаются быстрым формированием сульфата свинца, особенно на поверхности электродов. В результате поры активного материала в поверхностном слое оказываются заметно сужеными, либо закупоренными полностью

(из-за расширения активной массы при превращении ее в сульфат), следовательно, затрудняется поступление новых порций электролита в глубь пластин за счет диффузии. Напряжение элемента быстро падает, а доступная емкость разряда батареи может составлять всего лишь небольшую часть от номинального значения, измеренного при разрядном токе $C10'$ [2].

У ЛИА при переходе к малым временам разряда (большим разрядным

¹Значение тока дано в относительных единицах С (С-рейтинг). С-рейтинг определяет скорость разряда или заряда аккумулятора (батареи). $C10$ соответствует силе тока, при которой полностью заряженный аккумулятор разряжается в течение десяти часов, соответственно $1C$ – за один час, $0,5C$ или $C2$ – за два часа, $2C$ – за полчаса и т.п.

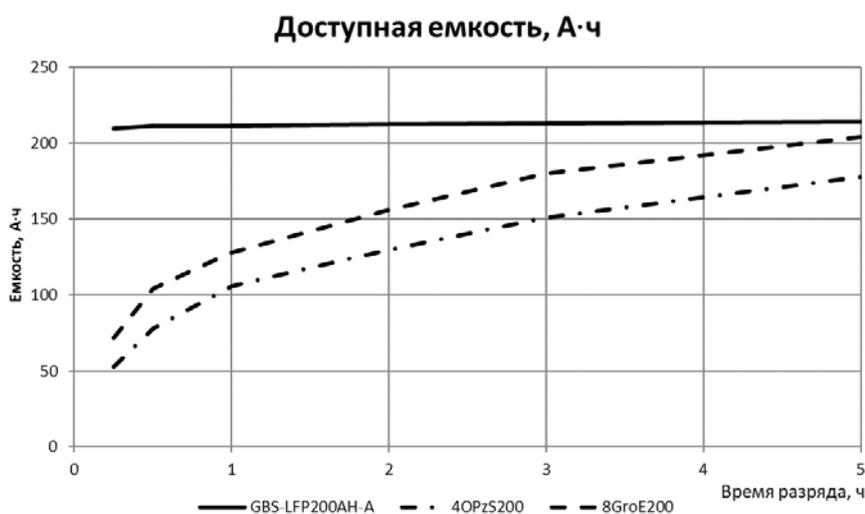


Рис. 1. Зависимость доступной емкости от времени разряда аккумуляторов GBS-LFP200Ah, 4OPzS200, 8GroE200. Номинальная емкость аккумуляторов равна 200 А·ч

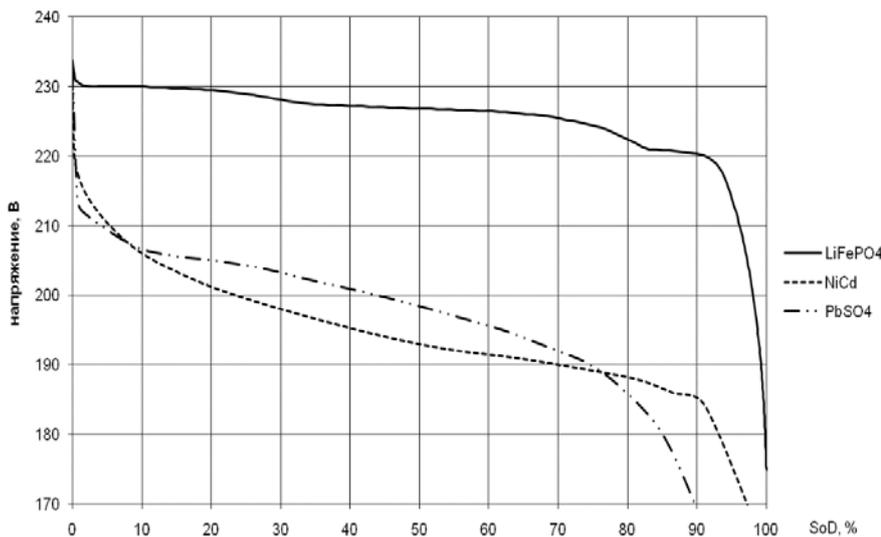


Рис. 2. Зависимости напряжения от степени разряда для различных АБ при разряде токами 0,2 С. Напряжение подзаряда каждой АБ равно 232 В

тока) незначительное снижение емкости обусловлено лишь увеличением потерь энергии на внутреннем сопротивлении при протекании через аккумулятор разрядного тока, либо тем фактом, что вследствие большего падения напряжения на внутреннем сопротивлении, разряд аккумулятора фактически останавливается при большей степени его заряженности. Соответственно доступная емкость ЛИА по сравнению с СКА той же номинальной емкости при временах разряда два часа и менее будет заметно больше. Это проиллюстрировано на рис. 1.

Разрядные характеристики у ЛИА носят более пологий характер

Это означает, что по сравнению со СКА, напряжение на выводах ЛИА по мере их разряда снижается существенно меньше, вплоть до степени разряда 90 % (рис. 2).

ЛИА имеют низкое значение поляризационного потенциала

Влияние поляризационного потенциала на процесс заряда и разряда анализировалось в [3]. Исходя из физического смысла, поляризационный потенциал корректно определять как потенциал заряда емкости диэлек-

трического слоя электрод-электролит, который он имеет при зарядке/разряде малыми токами. Он определяется как отклонение измеренного напряжения на аккумуляторе от напряжения разомкнутой цепи при протекании через него тока, за вычетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении. Величина поляризационного потенциала у СКА равна примерно 140 мВ. Эта величина определяет снижение напряжения на аккумуляторе при переходе его из режима поддерживающего заряда в режим разряда.

Для литий-ионного аккумулятора эта величина существенно ниже (примерно 10–20 мВ). То есть при переходе ЛИАБ из режима поддерживающего заряда в режим разряда напряжение на ней уменьшается существенно меньше по сравнению со СКАБ. Это видно на рис. 2. Параметры аккумуляторных батарей в примере подобраны таким образом, что напряжение поддерживающего заряда равно 232,0 В для всех типов батарей. Данные для NiCd и LFP предоставлены производителями, данные для PbSO₄ получены исходя из анализа графиков, представленных в [4] для аккумулятора OCSM145. Видно, что в начальный период разряда напряжение на ЛИАБ падает приметно на 20 В меньше по сравнению со СКАБ.

ЛИА имеют малое внутреннее сопротивление

Если сравнить внутренне сопротивление ЛИА, приведенное к напряжению 2 В (для корректного сравнения с СКА), с внутренним сопротивлением СКА той же номинальной емкости, то у ЛИА оно будет в примерно в 1,5 раза ниже по сравнению с лучшими СКА [5]. Поэтому в момент протекания импульса тока (при наличии толковой нагрузки) падение напряжения на внутреннем сопротивлении у ЛИА будет соответственно меньше.

Более высокое значение доступного тока на малых временах разряда

Поскольку при переходе к малым временам разряда у ЛИА нет ограничений, связанных с конечностью скорости протекания химической реакции, то доступен существенно боль-

ший разрядный ток по сравнению со СКА (рис. 4).

Совокупность этих факторов – отсутствие ограничений емкости при быстрых разрядах, пологий характер разрядных характеристик, низкое значение поляризационного потенциала, малое внутреннее сопротивление и более высокая токоотдача, позволяют выбрать при проектировании для одного и того же объекта емкость ЛИАБ значительно меньшей величины, чем СКАБ.

Данный факт не раз подтверждался экспериментально. Так, при реализации проекта замены АБ на ГПП-2, СКАБ СК20 номинальной емкостью 720 А·ч была заменена на ЛИАБ LFP номинальной емкостью 480 А·ч [6], а при реализации проекта замены АБ в КЦ №3 КС №11 Комсомольского ЛПУ ООО «Газпром трансгаз Югорск» СКАБ OPzS номинальной емкостью 800 А·ч была заменена на ЛИАБ LFP номинальной емкостью 380 А·ч [7].

В рамках НИОКР ПАО «Россети», посвященному использованию ЛИАБ в составе СОПТ, на одной из распределительных подстанций 220 кВ на испытуемом объекте вместо СКАБ, состоящей из аккумуляторов Vb 2311+ номинальной емкостью 550 А·ч, удалось использовать ЛИАБ, состоящую из аккумуляторов LT-LFP 170 номинальной емкостью 170 А·ч [8]. При этом отмечалось, что можно было использовать ЛИАБ еще меньшего номинала, но у предприятия-изготовителя в линейке оборудования не было аккумуляторов меньшей емкости.

Кроме того, указанные выше преимущества иногда позволяют выстроить СОПТ на ЛИАБ без хвостовых элементов на тех подстанциях, где ранее, при использовании СКАБ, было обязательным их наличие. Этот факт приводит к дополнительному снижению стоимости оборудования.

ЛИАБ для своей эксплуатации не требует специального помещения

Большим недостатком обслуживаемых СКАБ является то, что в процессе их работы в некоторых режимах (ускоренный заряд, выравнивающий заряд) выделяется большое количество водорода. В связи с этим, согласно [9], СКАБ необходимо размещать в специализированных помещениях с классом взрывоопасности В-1а. Помимо этого,

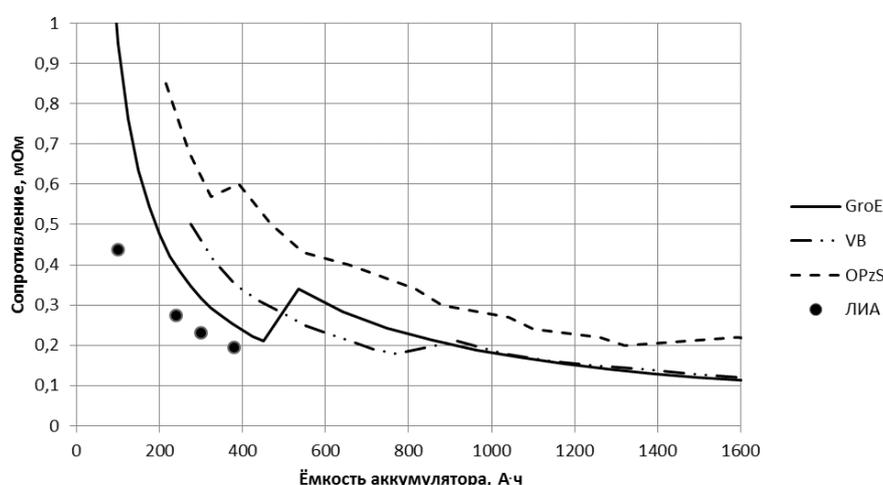


Рис. 3. Зависимость внутреннего сопротивления аккумуляторов от номинальной емкости (величина внутреннего сопротивления ЛИАБ приведена к напряжению 2 В)

Доступный ток разряда, А

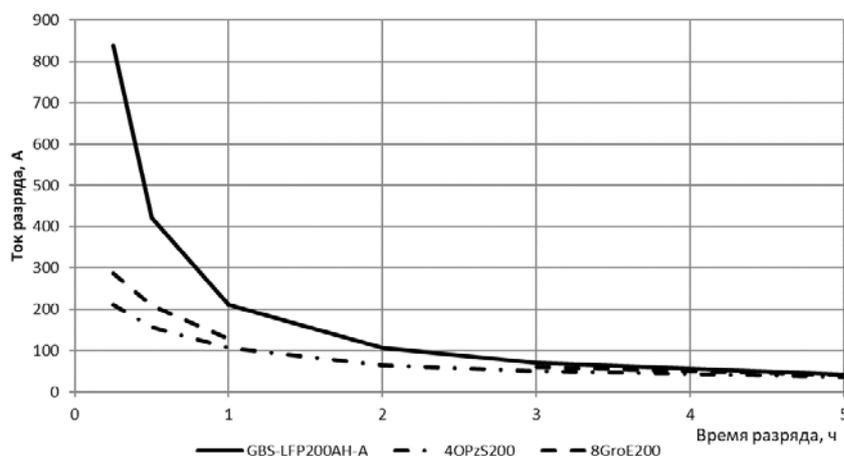


Рис. 4. Зависимость доступного тока разряда от времени разряда аккумуляторов GBS-LFP200Ah, 4OPzS200, 8GroE200. Номинальная емкость аккумуляторов равна 200 А·ч

требуется создание сложной инженерной инфраструктуры, включающей сооружение тамбура и помещения для хранения кислоты, установку отдельной системы приточно-вытяжной системы вентиляции во взрывозащищенном исполнении, установку взрывозащищенных светильников и т.д. Все это требует существенных дополнительных затрат при сооружении энергообъекта. Кроме того, при проектировании энергообъекта предусматривается, что у аккумуляторного помещения должна быть как минимум одна внешняя стена здания, сооружаемая из легко разрушаемых материалов.

Площадь аккумуляторных помещений может достигать 100 м² и более.



Рис. 5. Расположение СКАБ в аккумуляторном помещении

Учитывая то, что на крупных энергообъектах может использоваться несколько батарей, стоимость владения СКАБ и инфраструктуры для их использования становится сопоставимой со стоимостью самого оборудования. На рис. 5



Рис. 6. Расположение ЛИАБ



Рис. 8. Результаты химического анализа катода аккумулятора, подвергшегося перезаряду (1), а также катода и анода нормального аккумулятора (2, 3)

показан пример расположения СКАБ в аккумуляторном помещении.

В отличие от СКАБ для ЛИАБ не требуется отдельное помещение, и она может эксплуатироваться, например, в помещении общеподстанционного пункта управления, рядом с оборудованием релейной защиты и автоматики (рис. 6).

ЛИАБ менее чувствительна к высокой температуре

Оптимальная температура эксплуатации СКАБ – плюс 20 °С. При увеличении температуры на каждые 10 °С срок их эксплуатации сокращается в два раза. Этот факт обусловлен процессом коррозии свинцового электрода, при котором постепенно ухудшается связь пластины с проводником тока, что приводит к росту внутреннего сопротивления, а к концу срока службы может даже превратиться в обрыв электрической цепи [10]. Интенсивность коррозионного износа электродов резко возрастает при повышении температуры, поэтому крайне важно поддерживать оптимальную температуру эксплуатации СКАБ. Иногда это требует кондиционирования помещения, если в нем расположены источники тепла.

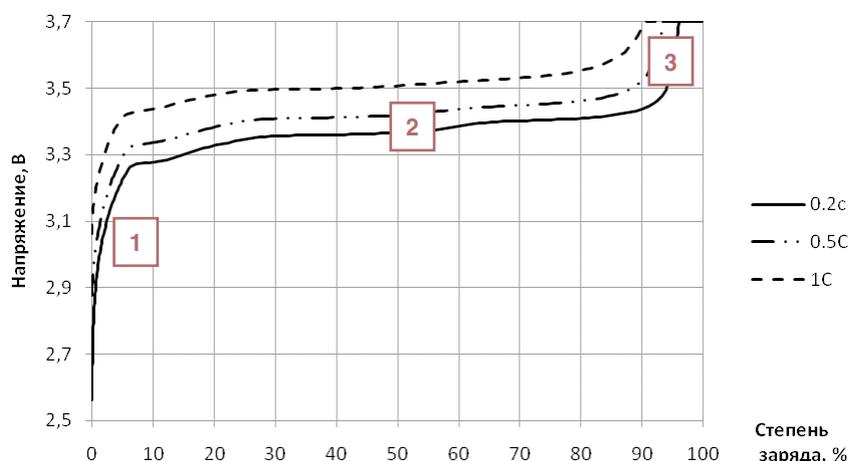


Рис. 7. Типичный график заряда ЛИА

В отличие от СКАБ ЛИАБ менее чувствительны к воздействию высоких температур. Для них не требуется охлаждение, даже если они располагаются в помещении, где есть источники тепла (силовое оборудование).

НЕДОСТАТКИ ЛИАБ ПО СРАВНЕНИЮ СО СКАБ

При эксплуатации ЛИАБ необходима система контроля и управления (СКУ)

Недостатки ЛИАБ являются следствием их достоинств. В отличие от СКА, состояние «аккумулятор заряжен на 100 %» для ЛИА является относительным. Стандарт DIN 40729 [11] определяет понятие «полный заряд свинцово-кислотного аккумулятора», как заряд с преобразованием всего активного вещества. Таким образом, СКА, заряженный на 100 %, это аккумулятор, у которой весь сульфат свинца преобразовался в металлический свинец (на отрицательном электроде) или в двуокись свинца (на положительном электроде), то есть этому понятию соответствует вполне конкретное и однозначно определяемое состояние электрохимической системы. СКА в принципе не может быть заряжен выше 100 %.

Для литий-ионного аккумулятора «степень заряженности 100 %» величина относительная. Это понятие не определяет однозначно состояние электрохимической системы. Условно за 100 % заряда большинство производителей ЛИА LFP считают заряд, который аккумулятор получил при заряде его током

нормированной величины I_n (обычно 0,2–0,5 С) до достижения напряжения на аккумуляторе 3,7 В, с последующим переходом в режим заряда при постоянном напряжении до снижения величины зарядного тока до $0,1 I_n$. Если не остановить заряд в этот момент, аккумулятор будет заряжаться дальше. При этом аккумулятор переходит порог при котором почти все ионы лития из положительного электрода деинтеркалированы, их количество становится недостаточным для поддержания химической реакции на прежнем уровне. В этом случае параллельно запускается другая химическая реакция, которая связана с преобразованием вещества электролита (в котором также содержатся ионы лития), что приводит к деградации аккумулятора вследствие его перезаряда. Этот фазовый переход сопровождается нелинейным ростом поляризационного потенциала (область 3 на рис. 7).

Поэтому, с одной стороны, при заряде ограничивают напряжение на аккумуляторе (например, снижая зарядный ток), с другой, в определенный момент времени тем или иным образом полностью останавливают дальнейший заряд аккумулятора, так как в противном случае возможна его деградация. Вследствие этого в процессе эксплуатации ЛИАБ необходим мониторинг состояния каждого аккумулятора, а не только состояния батареи в целом. Для этих целей используется СКУ.

Косвенным свидетельством того, что аккумулятор подвергся перезаряду, служит повышенный НРЦ аккумулятора, который не возвращается к нормальному значению 3,34–3,36 В

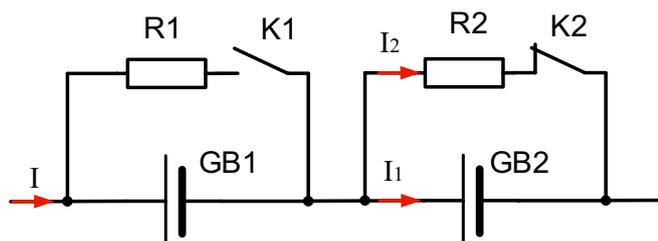


Рис. 9. Принцип работы метода пассивной балансировки

(для литий-железо-фосфатных аккумуляторов). Активное вещество отрицательного электрода аккумулятора, подвергшегося перезаряду, имеет щелочной характер, что можно устранить с помощью лакмусовой бумаги.

Необходима периодическая балансировка ЛИАБ

Необходимость периодической балансировки литий-ионных аккумуляторов в батарее также является следствием неопределенности понятия «степень заряженности 100 %». Даже если предварительно полностью выровнять степень заряженности литий-ионных аккумуляторов в батарее, то с течением времени будет происходить их разбалансировка, обусловленная различием их параметров (емкость, скорость саморазряда, внутреннее сопротивление). Это касается не только циклического режима работы, но и режима поддерживающего заряда. Поэтому необходимо периодически выравнивать степень заряженности аккумуляторов в составе ЛИАБ.

Различают методы пассивной и активной балансировки. В случае использования метода пассивной балансировки, в процессе заряда аккумуляторной батареи аккумуляторы, имеющие большую степень заряда, шунтируются специальными резисторами, на которых рассеивается избыточная энергия (рис. 9).

В случае выполнения условия для включения ключа K2 (напряжение на аккумуляторе GB2 и разница напряжений на аккумуляторах GB2 и GB1 выше установленных пороговых величин), ключ K2 включается, и резистор R2 шунтирует аккумулятор. За счет этого (в соответствии с первым законом Кирхгофа) аккумулятор GB2 заря-

жается меньшим током по сравнению с GB1, либо не заряжается вовсе. К достоинствам метода пассивной балансировки можно отнести простоту реализации и сравнительно низкую стоимость. К его недостаткам можно отнести то, что этот метод эффективно работает только при заряде, при этом излишняя энергия не используется, а рассеивается в виде тепла.

В случае использования метода активной балансировки, аккумулятор, имеющий большую степень заряженности (повышенное напряжение), отдает энергию менее заряженному аккумулятору. Один из вариантов реализации метода активной балансировки показан на рис. 10.

Аккумуляторы GB1 и GB2 через соответствующие преобразователи и трансформаторы напряжения подключены к общей шине переменного тока. В случае если аккумулятор GB2 имеет более высокое напряжение, чем аккумулятор GB1, то избыточный ток I1 через обмотку трансформатора поступает в аккумулятор GB1, дополнительно заряжая его. К достоинствам метода активной балансировки можно отнести то, что этот метод эффективно работает не только при заряде, но и при разряде, при этом излишняя энергия используется, а не рассеивается в виде тепла. Кроме того, для реализации данного метода не требуется центральный контроллер. К недостаткам можно отнести его более высокую стоимость.

Существуют особенности эксплуатации ЛИА в режиме поддерживающего заряда

Низкое значение поляризационного потенциала накладывает ограничения на эксплуатацию ЛИА в режиме поддер-

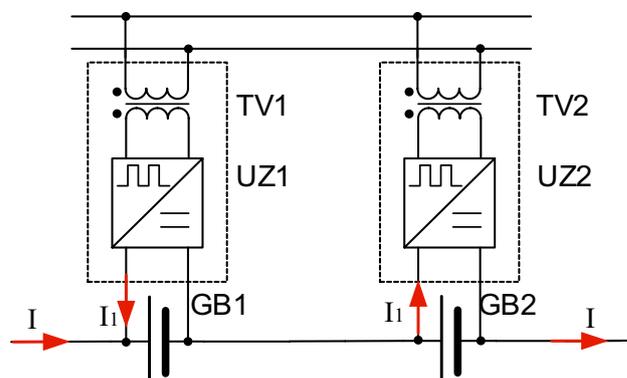


Рис. 10. Принцип работы метода активной балансировки

живающего заряда. Вследствие низкого значения поляризационного потенциала ЛИА становятся более чувствительны к действию пульсаций напряжения, имеющих на выходе зарядно-выпрямительными устройствами (ЗУ), так как при меньших значениях пульсаций напряжения может возникнуть переменный ток, протекающий через аккумуляторную батарею. Переменный ток сокращает срок службы АБ любого типа электрохимии. Наличие переменной составляющей тока приводит к дополнительному нагреву и усиленной коррозии на границе между металлической подложкой электрода и его активным веществом, росту переходного сопротивления и, соответственно, снижению срока службы батареи. В стандарте [12] дается ограничение на уровень пульсаций тока из расчета 5 % от номинальной емкости аккумуляторной батареи. Как было указано в [13], крайне нежелательным является разнонаправленный характер тока в режиме поддерживающего заряда, который возникает, когда переменная составляющая тока, обусловленного пульсациями, превосходит величину постоянного тока (например, в режиме поддерживающего заряда). Многократное изменение направления протекания тока приводит к неравномерному старению электрода и его деформации.

С этой точки зрения, совместно с ЛИАБ целесообразно использовать ЗУ транзисторного типа, использующие метод ШИМ модуляции. Частота пульсаций на выходе таких ЗУ, как правило, составляет несколько десятков кГц, и величина переменной составляющей тока, протекающей через АБ, эффективно ограничивается индуктивностью кабеля между АБ и ЗУ. Кроме того, величина пульсаций на выходе таких ЗУ

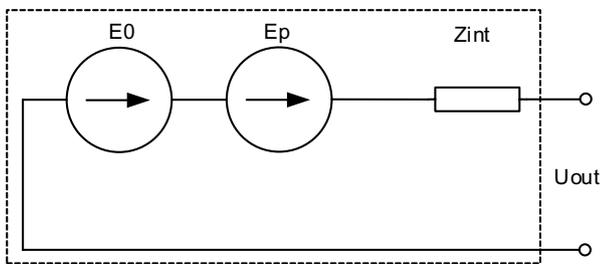


Рис. 11. Эквивалентная схема аккумулятора. Здесь:

E_0 – напряжение разомкнутой цепи (НРЦ) аккумулятора, $E_0 = f(S_0C)$;

E_p – поляризационный потенциал;

Z_{int} – импеданс аккумулятора, $Z_{int} = f(\omega)$

составляет десятые доли процента, что уменьшает вероятность возникновения разнонаправленного тока через батарею в режиме поддерживающего заряда.

АЛГОРИТМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИАБ В РЕЖИМЕ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГО ЗАРЯДА

Для правильной эксплуатации ЛИАБ в режиме поддерживающего заряда возможна реализация нескольких сценариев.

Сценарий точного поддержания напряжения на АБ

Такой сценарий подразумевает точное поддержание значения напряжения на выходе ЗУ на таком уровне, при котором ток заряда АБ приблизительно равнялся бы току поддерживаемого заряда. Для того, чтобы пояснить его суть необходимо рассмотреть упрощенную модель АБ, представленную на рисунке 11 и описанную в работе [3].

Величина НРЦ литий-железо-фосфатного аккумулятора, заряженного на 80–100 %, примерно равна 3,33–3,34 В, поляризационный потенциал $E_p \sim 10$ –20 мВ. Чтобы аккумулятор находился в заряженном состоянии, необходимо обеспечить на его входе напряжение примерно 3,34–3,35 В, при таком напряжении токи саморазряда будут компенсироваться током подзаряда. При большем напряжении подзаряда аккумулятор получит избыточный заряд, при меньшем – степень его заряженности опустится ниже 80 %.

Оценим величину тока подзаряда (сделаем оценку сверху). Требуемая величина тока подзаряда складывается из следующих величин:

- компенсация тока саморазряда. Как правило, производители гарантируют,

что величина саморазряда ЛИА не превосходит 1–3 % от его емкости в месяц. Для аккумулятора емкостью 100 Ач эта величина равна 1–3 Ач. Такая величина потерянной энергии за месяц соответствует току саморазряда примерно 1, 3–4 мА;

- компенсация мощности, потребляемой СКУ. Типичная величина потребляемой мощности контроллером СКУ составляет 2 Вт. Для батареи напряжением 220 В эта величина мощности соответствует потребляемому току примерно 9 мА;

- компенсация мощности, определяемой защитно-коммутационными устройствами. Иногда на выходе батареи ставится контактор, который обеспечивает дополнительную защиту от глубокого разряда единичного аккумулятора. Типичное значение тока, потребляемого катушкой контактора, составляет примерно 70 мА при напряжении 24 В. Это соответствует потребляемой мощности контактора 1,7 Вт или потребляемому току батареи примерно 7 мА.

Таким образом, в зависимости от комплектации батареи, ЗУ должен обеспечить ток поддерживающего заряда 13–20 мА.

К недостаткам сценария точного поддержания напряжения можно отнести следующие факторы:

- необходимость точного поддержания напряжения подзаряда – это определяет высокие требования к величине статической стабилизации ЗУ;
- необходимость уточнения величины напряжения поддерживающего заряда для разных типов аккумуляторов;
- при этом не исключается влияние пульсаций тока, обусловленных пульсациями напряжения на выходе ЗУ.

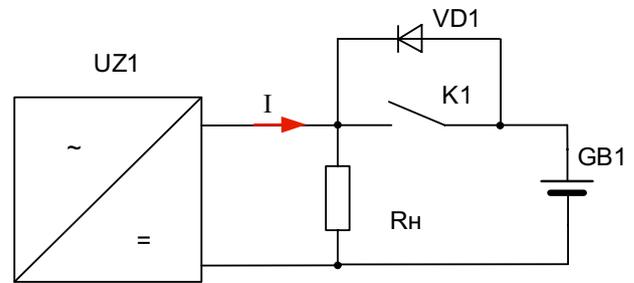


Рис. 12. Схема подключения аккумуляторной батареи

Сценарий отключения заряда при достижении определенной величины напряжения

Схема, поясняющая суть этого сценария, представлена на рис. 12.

Аккумуляторная батарея GB1 подключена к выходу зарядного устройства UZ1 через коммутационное устройство K1 (контактор или иной коммутационный аппарат), обеспечивающее прерывание цепи заряда в нужный момент. Данное коммутационное устройство должно быть отключено в случае, если степень заряда батареи достигает заданного уровня 90–95 %. Заряд батареи вычисляется либо через подсчет зарядного тока (определение кулоновского интеграла), либо через измерение напряжения на отдельном аккумуляторе. Таким образом, аккумуляторная батарея в нужный момент времени отключается от выхода ЗУ и дальше не заряжается. При этом она остается подключенной к нагрузке через силовой диод VD1, включенный параллельно коммутационному устройству таким образом, что не дает ей заряжаться, но дает ей питать нагрузку в случае исчезновения питания на выходе ЗУ без токовой паузы. Таким образом, батарея не заряжается выше установленной величины, в то же время она всегда остается подключенной к нагрузке.

Коммутационное устройство может включиться в следующих случаях:

- после исчезновения переменного напряжения собственных нужд и начала аварийного разряда батареи через установленную задержку времени (несколько секунд);
- при разряде батареи на установленную величину заряда, определенную через измерение напряжения на батарее или иным другим способом;

- периодически один раз в установленный промежуток времени (например, один раз в месяц) для компенсации тока саморазряда;

- в любом другом случае, определенном оператором.

Данный режим обеспечивает работу аккумуляторной батареи, при котором она:

- гарантированно не заряжается выше определенной величины;
- не разряжается ниже установленной величины;
- готова питать нагрузку без токовой паузы в любой момент времени;

Фактически ЛИАБ эксплуатируется в режиме хранения – наиболее щадящем режиме для аккумуляторов. Как показывает практика, качественные ЛИА в режиме хранения, при соблюдении всех мер, предусмотренных производителем (периодический цикл заряда-разряда), теряют менее 1 % емкости в год, то есть срок службы такой батареи в режиме поддерживающего заряда при таком сценарии составит не менее 20 лет.

Сценарий работы в режиме микроциклирования

Для того, чтобы избежать перезаряда ЛИАБ в режиме поддерживающего заряда, можно использовать сценарий работы, при котором батарея всегда либо заряжается, либо разряжается на небольшую нагрузку. На практике этот сценарий зачастую является модификацией предыдущего сценария, так как в качестве нагрузки в фазе разряда, как правило, используется цепи питания СКУ и светосигнальная аппаратура батареи.

Сценарий отключения ЗУ по команде СКУ

Еще одной разновидностью сценария отключения заряда при достижении определенной величины напряжения, является сценарий, при котором зарядное устройство само прерывает заряд батареи по команде СКУ. В данном случае необходимо согласование протокола информационного обмена между управляющим контроллером ЗУ и СКУ. В простейшем случае в качестве сигнала обратной связи используется беспотенциальный контакт, который замыкается по команде СКУ батареи.

Данная схема иногда используется в источниках бесперебойного питания.

ВЫВОДЫ

С точки зрения использования в составе СОПТ ЛИА имеют следующие преимущества по сравнению с СКА:

- хорошие разрядные характеристики. Это обусловлено следующими факторами:

- не уменьшается емкость при переходе к малым временам разряда (два часа и менее),
- пологая кривая напряжения при разряде,
- малое значение поляризационного потенциала,
- малое внутреннее сопротивление,
- доступен существенно больший разрядный ток;

- ЛИАБ для своей эксплуатации не требует специального помещения;

- ЛИАБ менее чувствительна к высокой температуре.

В то же время, ЛИА имеют следующие недостатки по сравнению с СКА:

- при эксплуатации ЛИАБ необходима система контроля и управления (СКУ);
- необходима периодическая балансировка ЛИАБ;

- низкое значение поляризационного потенциала накладывает ограничение на эксплуатацию ЛИА в режиме поддерживающего заряда. ЛИА нельзя эксплуатировать так же, как СКА.

Чтобы обеспечить длительный срок эксплуатации ЛИАБ (не менее 20 лет) в режиме поддерживающего заряда, существуют несколько сценариев, описанных в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ворошилов А.Н.* Экономические аспекты использования литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ / Ворошилов А.Н., Хакимянов Э.Ф., Агзамов М.Ф., Газетдинов Р.Ф. // Энергоэксперт, информационно-аналитический журнал – Москва: Издательский дом «Вся электротехника», 2023 – № 1 – с. 43–51.

2. Стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Руководство по эксплуатации. Часть 1: Основные понятия, конструкция, режимы работы и область применения. / Exide Technologies, Hanbook, 2006, с. 67.

3. *Ворошилов А.Н.* Литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея.

Моделирование режима заряда / Ворошилов А.Н., Петров А.Н., Чудинов Е.А. // Новости электротехники 2017 – № 2 с. 44–49.

4. Методика расчета и выбора аккумуляторных батарей серий Classic GroE b Classic OSCM для применения в энергетике, М. 2005, с. 7;

5. *Чудинов Е.А.* Применение литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей в составе СОПТ на распределительных подстанциях и электростанциях / Е.А. Чудинов, А.Н. Ворошилов, С.В. Кучак // Энергоэксперт: информационно-аналитический журнал – Москва: Издательский дом «Вся электротехника», 2016 – № 2 – С. 46–54.

6. Результаты опытно-промышленной эксплуатации СОПТ на основе литий-ионных аккумуляторов в цехе сетей и подстанций АО «УЭХК». Доклад к заседанию НТС ПАО «Россети» 17.07.2018 г.

7. *Шаповало А.А.* Опыт применения литий-ионных аккумуляторов в системах постоянного тока (220 В) производственных объектов ПАО «Газпром» / Шаповало А.А., Коноплев Т.Ф., Югай В.Ф., Толмачев В.Н., Устименко Л.А. // Газовая промышленность – Москва, 2019 – № 11 – с. 20–30.

8. *Лебедев Д.Е.* Система обеспечения резервного питания подстанции с помощью литий-ионных батарей. Испытание опытного образца / Лебедев Д.Е., Потапенко А.М., Иваницкий С.С. // Энергия единой сети – Москва, 2021 – №№ 5–6, с. 34–40.

9. Правила устройств электроустановок, изд. 7-е, раздел 4.4.

10. Стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Руководство по эксплуатации. Часть 1: Основные понятия, конструкция, режимы работы и область применения. / Exide Technologies, Hanbook, 2006, с. 32.

11. Стандарт DIN 40729: 1985-05 ICS: 29.220.20 Acid secondary cells and batteries.

12. Стандарт ПАО ФСК ЕЭС СТО 56947007-29.120.40041–2010 Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования.

13. *Гусев Ю.П.* Аккумуляторные батареи для систем оперативного постоянного тока подстанций ЕНЭС // Энергоэксперт, 2009 – № 4 с. 24–29.