

Свинцово-кислотные аккумуляторы:

устройство, принцип действия, применение

Владимир Гуревич

Стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (АБ) являются важнейшим компонентом систем электропитания постоянного тока на подстанциях и электростанциях. В России их наличие на подстанциях является обязательным для напряжений 110 кВ и выше, а во многих западных странах они являются важнейшим атрибутом подстанций всех классов. К сожалению, существующие нормативные документы — инструкции по эксплуатации и стандарты — далеко не всегда могут ответить на многочисленные вопросы, возникающие при работе с АБ. Данная статья призвана дополнить их сведениями, необходимыми для понимания устройства АБ и процессов, протекающих в них, без которых невозможен правильный выбор типа АБ и их эксплуатация.

Исторический экскурс

История свинцового аккумулятора, в современном его виде, начинается с 1859 г., когда французский ученый Гастон Планте (Gaston Plante, рис. 1), сотрудник известной в то время лаборатории Александра Эдмона Беккереля (Alexandre-Edmond Becquerel), взял две тонкие свинцовые пластины (Pb), проложил между ними обычную ткань (сейчас эта функциональная деталь аккумулятора называется «сепаратором»), намотал этот «сэндвич» на деревянный цилиндр и поместил его в стеклянную банку с 10%-ным раствором H_2SO_4 (рис. 2).



Рис. 1. Гастон Планте (1834–1889)

Первые аккумуляторы Планте обладали настолько мизерной емкостью, что говорить об их практическом применении не имело смысла. Но было замечено, что ток аккумулятора оказывался тем сильнее, чем большей была поверхность пластин, соприкасающаяся с раствором электролита. Появились свинцовые пластины с порами и ребрами, похожими на жабры рыб. Потом было обнаружено, что если заряженный первоначально аккумулятор разрядить, затем пропустить через него ток в обратном направлении, да еще проделать эту операцию не один раз, то емкость аккумулятора значительно возрастает. Это становится понятным, если учесть, что в электрохимической реакции в аккумуляторе участвует не только чистый свинец (отрицательная пластина), но и его оксид, а также диоксид — PbO_2 (положительная пластина). Диоксид свинца образуется на положительном свинцовом электроде при зарядке аккумулятора. Для достижения приемлемых результатов потребовалось большое количество циклов заряда/разряда. Этот процесс получил название формовки пластин, он занимал у Планте более трех месяцев.

В 1878 г. французскому инженеру-химику Эмилю Альфонсу Фору (Emile Alphonse Faure) пришла в голову идея нового метода формовки пластин. Он стал покрывать («намазывать») пластины свинцовым суриком (Pb_3O_4) заранее, еще до сборки аккумулятора. В процессе зарядки сурик на положительной

пластине превращается в диоксид свинца, который и является активной массой положительного электрода.

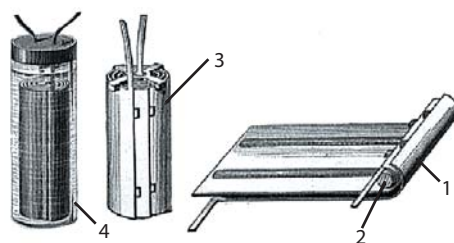


Рис. 2. Первый свинцово-кислотный аккумулятор, изготовленный Гастоном Планте (1 — «сэндвич» из двух тонких листов свинца с тканевой прокладкой между ними; 2 — деревянный цилиндр; 3 — готовый блок электродов; 4 — стеклянная колба с раствором серной кислоты)



Рис. 3. Один из первых пластинчатых аккумуляторов — прообраз современных конструкций

пластине превращался в перекись (двуокись или диоксид свинца — PbO_2), а на отрицательной соответственно раскислялся с выделением губчатого свинца, при этом благодаря образованию многочисленных пор его площадь поверхности существенно увеличивалась. Процесс формовки, осуществленный К. Фором, проходил значительно быстрее и был намного эффективнее. В результате аккумуляторы Фора при том же весе запасали значительно больше электрической энергии, чем аккумуляторы Планте.

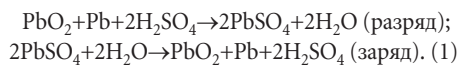
Естественным развитием идеи Фора было создание в 1881 г. Э. Фолькмаром (E. Volkmar) электродов в виде намазной решетки, в ячейках которых хорошо удерживался свинцовый сурик. В том же году ученому Селлону (J. Scudamore Sellon) был выдан патент на технологию производства решеток из сплава свинца и сурьмы.

При производстве современных аккумуляторов используются новые технологии и материалы, но основные принципы Планте–Фора–Фолькмара, заложенные еще в позапрошлом веке, остались неизменными (рис. 3).

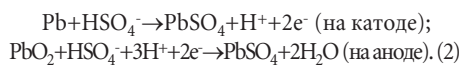
Принцип действия свинцово–кислотных аккумуляторов

Активной массой положительного электрода (анода) аккумулятора служит перекись (диоксид) свинца PbO_2 темно-коричневого цвета, а активной массой отрицательного электрода (катода) — чистый (губчатый) свинец Pb светло-серого цвета. Электролитом является 25–34%-ный водный раствор серной кислоты. Емкость аккумулятора зависит от площади активной поверхности электродов (пластин) и от количества пластин, соединенных параллельно. Отрицательных пластин всегда на одну больше, чем положительных, так как каждая положительная располагается между двумя отрицательными. Это необходимо, чтобы обеспечить равномерное участие в электрохимических реакциях обеих поверхностей положительной пластины, поскольку при работе только одной ее поверхности тонкая положительная пластина коробится и может замкнуться с отрицательной.

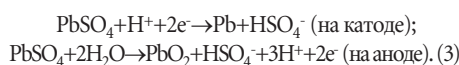
Принцип работы свинцово-кислотных аккумуляторов основан на электрохимических реакциях свинца Pb (катод) и диоксида свинца PbO_2 (анод) в сернокислотной (H_2SO_4) среде. Всего таких реакций в свинцовом аккумуляторе происходит более 60, но основополагающая суммарная химическая реакция при заряде/разряде, в соответствии с общепринятой теорией двойной сульфатации, описывается следующей реакцией:



При разряде:



При заряде:



Малорастворимое соединение $PbSO_4$, образующееся при разряде на обоих электродах, — сульфат свинца, именно поэтому теория, описывающая данный процесс, называется теорией двойной сульфатации. Поскольку при разряде серная кислота расходуется на образование сульфатов, происходит снижение ее концентрации, то есть плотности электролита с 1,23–1,30 г/см³ заряженного аккумулятора до значения 1,02–1,03 г/см³. Это, в свою очередь, приводит к снижению напряжения на электродах такого аккумулятора от начального значения 2,10–2,22 В (в зависимости от начальной концентрации серной кислоты) до 1,95–1,70 в конце полного разряда.

При заряде происходят обратные процессы: серная кислота выделяется в раствор электролита из сульфатов на электродах при участии воды (1), при этом плотность электролита и напряжение аккумулятора растут. В процессе заряда, ближе к его завершению, особенно повышенным током и при некоторых критических значениях концентрации сульфата свинца на электродах, наблюдается процесс электролиза (разложения) воды, на водород (возле катода) и кислород (воз-

ле анода). Выделяющиеся газы образуют взрывоопасную смесь в воздухе (с объемной концентрацией около 4% водорода), поэтому помещения с аккумуляторами относятся к разряду взрывоопасных. Кроме того, разложение воды приводит к уменьшению ее количества в аккумуляторе, что требует периодического ее пополнения. Правда, следует отметить, что существует решение этих проблем — пробки-рекомбинаторы (рис. 4), изготавливаемые некоторыми компаниями–производителями аккумуляторов, в частности, известной немецкой фирмой НОРПЕСКЕ. Устройства этой компании, которые называются пробками AquaGen, содержат специальный катализатор, превращающий 98% попавших в пробку водорода и кислорода в пары воды, конденсирующиеся на ее стенках в виде капелек, стекающих обратно в аккумулятор. Открытые кислотные аккумуляторы с жидким электролитом, снабженные такими пробками, компания НОРПЕСКЕ относит к классу необслуживаемых (безуходных), поскольку они не требуют доливки воды в течение всего срока службы (25 лет для аккумуляторов класса GroE). А к помещениям с аккумуляторами, снабженными такими пробками, компания предлагает относиться как к помещениям с герметизированными аккумуляторами, то есть, без организации принудительной приточно-вытяжной вентиляции.

В процессе эксплуатации аккумулятора при чередующихся зарядах и разрядах вследствие объемных изменений происходят разупрочнение активной массы PbO_2 на аноде и потеря механических и электрических связей между частицами, в результате чего активная масса на аноде разжижается и оплывает. Этому явлению способствует также обильное выделение пузырьков кислорода на поверхности анода в процессе заряда. При этом свойства аккумулятора постепенно ухудшаются, и он выходит из строя. Кроме того, осыпание частиц диоксида свинца, обладающего высоким сопротивлением, с анода и его электрофоретический перенос к катодным пластинам обнажает их боковые кромки, что может привести к коротким замыканиям.



Рис. 4. Аккумуляторы компании НОРПЕСКЕ с установленными рекомбинационными пробками AquaGen

Влияние сульфатации электродов на работу аккумулятора

Срок службы активной массы положительного электрода в значительной степени определяется условиями кристаллизации PbSO₄ при разряде. Если осадки сульфата свинца на аноде образуются рыхлыми, то это способствует уменьшению разрушения активной массы, так как такой рыхлый слой при заряде переходит в прочную активную массу, состоящую преимущественно из крупнокристаллического диоксида свинца. Если же поверхность анода при разряде покрывается плотным слоем сульфата свинца, то образующиеся при заряде кристаллы PbO₂ растут преимущественно в виде дендритов, которые в конце заряда и в начале разряда могут осыпаться. Структура образующегося сульфата свинца во многом зависит от величины разрядного тока (чем он выше, тем большую плотность имеет его слой) и температуры (чем она выше, тем меньшую плотность имеет слой диоксида свинца).

Для повышения прочности активной массы электроды выполняют не из чистого свинца, а из сплава, содержащего 1–2% сурьмы и других примесей, а также часто соли кальция. Однако применение солей кальция приводит к ухудшению других свойств аккумулятора, например к существенному и необратимому снижению емкости при глубоких разрядах. Это происходит из-за необратимой реакции образования сульфата кальция на положительной пластине, который со временем блокирует ее поверхность.

Рассматривая вопрос о сульфатации электродов, необходимо особо подчеркнуть, что само по себе образование сульфатов PbSO₄ на электродах аккумулятора — естественный и совершенно необходимый процесс при разряде. Вредной является лишь усиленная, гипертрофированная сульфатация, при которой на поверхности электродов вместо рыхлого мелкокристаллического сульфата образуется сплошной плотный слой, состоящий из крупных кристаллов, изолирующий электроды и препятствующий их контакту с электролитом. У засульфатированного аккумулятора емкость в процессе разряда снижается необычайно быстро. Еще одним признаком усиленной сульфатации является обильное газовыделение и повышенное напряжение аккумулятора уже в самом начале заряда.

Глубокой сульфатации пластин аккумуляторов способствуют следующие факторы:

- Слишком глубокий разряд. В принципе, аккумулятор может разряжаться до полного превращения активных масс электродов в серноокислый свинец и истощения электролита. Однако практически разряд прекращают гораздо раньше, поскольку образующийся при разряде серноокислый свинец (соль белого цвета, плохо растворяющаяся в электролите) обладает низкой электропроводностью, что обуславливает резкое падение напряжения аккумулятора в конце процесса разряда. Поэтому разряд ведут не до конца, а только до того момента,

когда в серноокислый свинец перейдет около 35 % активной массы. В этом случае образовавшийся серноокислый свинец равномерно распределяется в виде мельчайших кристалликов в оставшейся активной массе, которая сохраняет еще достаточную электропроводность, чтобы обеспечить напряжение между электродами не ниже 1,7–1,8 В. При более глубоком разряде на электродах происходят частично необратимые изменения.

- Систематический недозаряд. При этом восстановление активного материала — PbO₂ из PbSO₄ (1) — происходит не в полной мере. Количество активного материала уменьшается, а количество сульфата возрастает, нарушая баланс химических реакций.
- Длительное хранение без подзарядки. При длительном хранении аккумулятора происходит его саморазряд. Как и при обычном разряде, в процессе саморазряда происходит расходование активного материала и образование сульфата в соответствии с реакцией, описываемой (1). При продолжительном хранении в заряженном состоянии аккумулятор необходимо периодически подзаряжать. Если он хранится при температуре ниже –20 °С, то подзарядку рекомендуется производить раз в год в течение 48 ч при постоянном напряжении 2,27–2,44 В. При хранении при комнатной температуре — один раз в восемь месяцев в течение 6–12 ч при постоянном напряжении 2,4 В. Хранение при температуре выше +30 °С нежелательно. Сильно сульфатированную батарею необходимо менять, ее ремонт невозможен.

Опасен для аккумулятора и длительный перезаряд повышенным током (при напряжении 2,4–2,7 В). В этом случае происходит интенсивное разложение воды на кислород и водород, сопровождающееся бурным выделением этих газов в виде пузырьков («кипением» воды), уменьшением количества воды, снижением уровня электролита. Хотя большое количество движущихся пузырьков газов могут способствовать осыпанию активного материала с анодной пластины, тем не менее, в литературе встречаются рекомендации по использованию такого режима зарядки в течение ограниченного времени для механической очистки пластин от кристаллов сульфата свинца.

Таблица 1. Расшифровка условных обозначений аккумуляторов

Маркировка	Расшифровка	Стандарт
GroE	Стационарные батареи с поверхностными положительными пластинами в традиционной компоновке	DIN 40732
	Стационарные батареи с поверхностными положительными пластинами в узкой компоновке	DIN 40738
OPzS	Стационарные батареи с панцирными положительными пластинами и разделителем	DIN 40736*; DIN 40737*
OPzV	Стационарные батареи с панцирными положительными пластинами и разделителем, герметизированные, с гелевым электролитом	DIN 40742
OGi	Стационарные батареи с решетчатыми стержневыми положительными пластинами	DIN 40734; DIN 40739
OGiV	Стационарные батареи с решетчатыми стержневыми положительными пластинами герметизированные, с гелевым электролитом	DIN 40737
GiV	Моноблочные батареи с решетчатыми положительными пластинами	DIN 43534
SPzV	Специальные батареи с панцирными положительными пластинами, герметизированные, с гелевым электролитом	DIN 43534; DIN 43539
PzS	Тяговые батареи с панцирными положительными пластинами	DIN 43531-5
PzV	Тяговые батареи с панцирными положительными пластинами, герметизированные, с гелевым электролитом	DIN 43531-5

Классификация свинцово-кислотных аккумуляторов

Свинцово-кислотные аккумуляторы классифицируются по нескольким признакам.

По конструкции используемых положительных пластин они делятся на:

- GroE — «поверхностные» или Планте (название, принятое на Западе);
- OPzS, PzS, OPzV, PzV, PzB — панцирные трубчатые;
- OGi, OGiV — стержневые намазные;
- OP, VRLA — решетчатые, называемые еще пастированными, или намазными.

По состоянию электролита:

- жидкий — GroE, OPzS, PzS, OGi, OP;
- гелеобразный — OPzV, PzV, PzB, OGiV;
- абсорбированный — VRLA.

По обслуживанию:

- мало обслуживаемые (открытого типа), для которых требуется долив воды в течение срока эксплуатации (GroE, OPzS, PzS, OGi, OP);
- герметизированные (закрытого типа), их иногда называют необслуживаемыми, для которых не требуется долив воды в течение срока эксплуатации (OPzV, PzV, PzB, OGiV, VRLA).

По назначению:

- стартерные для запуска двигателей внутреннего сгорания (SLI, ICE) и как источник электропитания автомобилей;
- тяговые для работы погрузочной техники, самоходных колясок и тележек для портативной техники и устройств;
- промышленные стационарные для объектов связи, энергетики, промышленности.

Буквенные обозначения классов аккумуляторов, указанные в скобках, предложены в немецких стандартах Deutsche Industrial Norm (DIN) и приняты сегодня во всем мире.

Расшифровка условных обозначений аккумуляторов согласно [5] приведена в таблице 1.

Типы пластин свинцово-кислотных аккумуляторов

Поверхностные пластины (электроды Планте) в принципе не отличаются от электродов, использованных в первых образцах аккумуляторов, и представляют собой лист чистого свинца толщиной 10–12 мм с боль-

шим количеством прорезей, благодаря которым площадь поверхности пластины увеличивается в 8–10 раз без увеличения ее внешних размеров. Современные технологии обработки свинца позволяют получить и более развитые поверхности (рис. 5).



Рис. 5. Современные конструкции положительной пластины поверхностного типа с большой площадью поверхности

На поверхности свинца электрохимически формируется относительно тонкий активный слой из двуокиси свинца. При работе аккумулятора часть двуокиси свинца осыпается, но в процессе заряда также образуются и новые слои PbO₂. Этим обеспечивается большой срок службы поверхностных пластин, достигающий до 15–25 лет. Напомним, что поверхностные пластины используют только в качестве положительных электродов в стационарных аккумуляторах, где удельная энергия не играет решающей роли, но важны надежность и долговечность. В качестве отрицательного электрода в аккумуляторах этого типа используются пастированные пластины, которые еще называются решетчатыми или намазными.

Современные поверхностные пластины принципиально мало чем отличаются от первых пластин Планте, так же, как решетчатые — от первых пластин Фора-Фолькмара.

Решетчатые (намазные или пастированные) положительные и отрицательные пластины состоят из профилированных решеток, в которые вмазана паста, образующая при формировании пластины активную массу (рис. 6). Решетки отливают обычно из свинцово-сурьмянистого сплава, содержащего 5–6% сурьмы и 0,2% мышьяка, а пасту изготавливают из свинцового порошка



Рис. 6. Решетка из свинцово-сурьмянистого сплава (слева) и готовая пластина, заполненная массой (справа)

и серной кислоты с различными связующими добавками.

Аккумуляторы с решетчатыми пластинами обладают высокой удельной емкостью (то есть при одинаковой емкости занимают меньший объем, чем аккумуляторы с положительными пластинами поверхностного типа), но имеют меньший срок службы, чем поверхностные электроды. Пастированные пластины имеют очень широкое распространение: они применяются и в стационарных, и в стартерных, и во многих других типах аккумуляторов.

Коробчатые пластины отличаются от решетчатых тем, что имеют дополнительные внешние стенки в форме коробов из тонких перфорированных листов свинца, препятствующих выпадению активной массы. Они имеют толщину около 8 мм. Коробчатые пластины обладают такой же, как и решетчатые, удельной емкостью, но большей механической прочностью. Коробчатые электроды используются в качестве отрицательных в комбинации с поверхностными или панцирными положительными электродами.

Панцирные пластины (рис. 7) имеют в качестве конструктивной основы гребенку 1, отлитую из свинцового сплава. На штыри

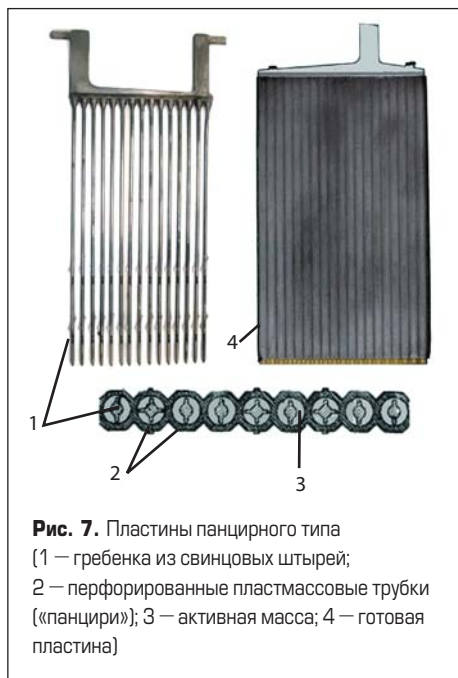


Рис. 7. Пластины панцирного типа (1 — гребенка из свинцовых штырей; 2 — перфорированные пластмассовые трубки («панцири»); 3 — активная масса; 4 — готовая пластина)



Рис. 8. Блоки положительных и отрицательных электродов стационарной батареи

этой гребенки надеваются перфорированные пластмассовые трубки («панцири») или общий фигурный футляр 2. Внутри трубок набивается активная масса 3. Трубки изготавливаются из эбонита, винилпласта, синтетических тканей и других материалов; часто используются подкладки из стекловолокна. Благодаря тому, что активный материал в панцирных электродах удерживается очень прочно, они хорошо выдерживают транспортную вибрацию и имеют удельную емкость в 1,7–2 раза большую, чем поверхностные пластины.

Они имеют большой ресурс: свыше 1000 циклов заряд/разряд и используются в качестве положительных электродов в тяговых, а иногда и в стационарных аккумуляторах. Независимо от конкретной конструкции электродов, они собраны в блоки параллельно соединенных с помощью перемычки отрицательных и блоки параллельно соединенных положительных электродов (рис. 8), которые либо устанавливаются на ножках на дно пластмассового контейнера прямоугольной формы (называемого банкой), либо подвешиваются на внутренних выступках контейнера. Блок положительных электродов вставляется в блок отрицательных электродов таким образом, что внешние пластины всегда отрицательные (их на одну больше). Между каждой положительной и отрицательной пластиной установлен сепаратор, изолирующий пластины, но проницаемый для электролита. На дне контейнера имеется свободное пространство, необходимое для накопления оплывающего активного материала.

Стартерные и отдельные виды тяговых аккумуляторных батарей собирают в сосудомоноблоках. Моноблок — это единый корпус батареи, разделенный перегородками на три или шесть ячеек (по количеству аккумуляторов, соответственно для 6- и 12-В батарей), соединенных последовательно с помощью внешних или внутренних перемычек.



Рис. 9. Моноблочная конструкция 12-В тяговых и стартерных батарей (1 — блок отрицательных электродов; 2 — блок положительных электродов; 3 — блок электродов одной ячейки в сборе; 4 — положительный полюс моноблока; 5 — отрицательный полюс моноблока; 6 — перемычки, соединяющие последовательно блоки электродов (ячеек); 7 — сепараторы между пластинами; 8 — осыпавшийся активный материал электродов; 9 — пластмассовый корпус моноблока)

Таблица 2. Сочетания электродов

Тип аккумулятора	GroE DIN40738	OGi DIN40734 DIN40739	OPzS DIN40736 DIN40737
Емкость аккумулятора, А·ч	15–2600	12–3500	40–12000
Напряжение аккумулятора, В	2,23		
Положительный электрод	Поверхностный	Намазной	Панцирный
Отрицательный электрод	Намазной		

В различных типах аккумуляторов используются различные сочетания электродов (таблица 2).

Типы электролитов

Помимо рассмотренных выше аккумуляторов с жидким электролитом имеются также аккумуляторы с гелеобразным и абсорбированным электролитом. Разработка таких электролитов была связана в первую очередь с попыткой создания герметичных аккумуляторов, не требующих обслуживания.

Для создания иммобилизованного (обездвиженного) электролита его загущают с помощью силикагеля (SiO_2), который обладает высокой пластичностью и заполняет и электроды, и сепаратор. Благодаря своей вязкости такой сгущенный электролит хорошо удерживается в порах, плотно обволакивает пластины и не дает активной массе осыпаться в процессе сушки, гелевая структура пронизывается микротрещинами, которые не дают испарениям электролита улетучиваться: молекулы кислорода и водорода, образующиеся в результате химических реакций, удерживаются внутри геля, реагируют между собой и превращаются в воду, которая впитывается гелем. Почти все испарения, таким образом, возвращаются обратно в аккумулятор, и это называется рекомбинацией газа. К сожалению, все молекулы рекомбинировать не удается, и избыточный газ все же сбрасывается иногда через предохранительные клапана. Происходит это обычно при больших токах заряда. Сепаратор в гелевых аккумуляторах тоже необычный. Это микропористый диоропластик, который за счет присадок из алюминия обладает высокой стойкостью в агрессивной среде, обладает низким внутренним сопротивлением, высокой температурной стабильностью и механической прочностью (вибропрочностью). Этот элемент является ноу-хау и производится всего двумя специализированными немецкими компаниями (все мировые производители аккумуляторов закупают сепараторы у них). Гелевые аккумуляторы выдерживают большое количество циклов заряда/разряда, могут долго находиться разряженными, имеют низкий саморазряд, их можно эксплуатировать почти в любом положении, что важно для транспортных установок и в жилых помещениях.

Аккумуляторы с гелеобразным электролитом обозначаются как OPzV, PzV, PzB, OGiV в зависимости от типа применяемых электродов (табл. 1).

Недостатками аккумуляторов с гелиевым электролитом является сильная чув-

ствительность к повышенному уровню напряжения заряда, при котором такой аккумулятор быстро и безвозвратно выходит из строя из-за разложения геля, а также резкое падение емкости аккумулятора при низкой температуре из-за чрезмерного загустевания геля.

При другом методе иммобилизации применяется сепаратор из стекловолокна с высокой объемной пористостью и хорошей смачиваемостью в растворе серной кислоты. Такой сепаратор не только осуществляет функцию разделения электродов, но и, благодаря тонкой структуре волокон, обеспечивает удержание электролита в порах и высокую скорость переноса кислорода. Применение стекловолокнистого сепаратора и плотная сборка блока электродов способствуют также уменьшению оплывания активной массы анода и разбухания губчатого свинца на катоде. Электролит такого типа обозначается как AGM (Absorbed in Glass Mat). Этот тип электролита менее чувствителен к пониженной температуре окружающей среды, чем гель.

Обычные аккумуляторы с жидким электролитом называются VLA (Vented Lead Acid), то есть вентилируемые свинцово-кислотные (а по сути — открытые), а аккумуляторы с гелеобразным и абсорбированным электролитом — VRLA (Valve Regulated Lead Acid), с регулируемыми клапанами, или SLA (Sealed Lead Acid), т. е. герметичные свинцово-кислотные. Поскольку называть герметичными аккумуляторы с клапаном для выпуска избытка газа не совсем правильно, в русскоязычной технической литературе их называют герметизированными.

Сухозаряженные аккумуляторы

Сухозаряженные аккумуляторы отличаются от остальных тем, что их пластины перед сборкой заряжают (формируют) на заводе-изготовителе, потом промывают и сушат горячим воздухом. Такие аккумуляторы поступают с завода в заряженном виде, но без электролита, поэтому он не готов к немедленному применению. Сухозаряженные аккумуляторы можно хранить в сухом закрытом помещении при температуре $+5...+30\text{ }^\circ\text{C}$ с плотно завинченными глухими пробками на протяжении одного–двух лет. Для ввода в эксплуатацию аккумуляторы заливают электролитом и через 1–2 ч измеряют его плотность. Если плотность электролита уменьшилась не более чем на $0,03\text{ г/см}^3$ от плотности заливаемого электролита, то аккумулятор можно сдавать в эксплуата-

цию без заряда, а если плотность электролита уменьшится более чем на $0,03\text{ г/см}^3$, то его нужно предварительно зарядить.

Что такое емкость аккумулятора?

Казалось бы, вопрос чисто риторический. Но не все так просто. В стандарте IEC 60896-21 [1] Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) можно найти несколько разных видов емкости аккумуляторов:

- rated capacity (расчетная емкость) — количество электричества, заявленное производителем, которое аккумулятор или батарея могут выдать при определенных условиях после полной зарядки;
- nominal capacity (номинальная емкость) — приблизительное количество электричества, используемое для обозначения емкости аккумулятора или батареи;
- actual capacity (реальная емкость) — количество электричества, выдаваемое аккумулятором или батареей, измеренное экспериментально путем разряда в установленном режиме до установленного конечного значения напряжения при установленной температуре;
- shipping capacity (емкость на стадии поставки) — количество электричества, заявленное производителем, которое аккумулятор или батарея могут выдать на момент поставки при установленных режимах и условиях разряда.

Совершенно очевидно, что перечисленные выше различные виды емкости будут иметь различные значения (иначе, зачем нужно их различать?) и при оценке (обсуждении) емкости аккумулятора или батареи важно понимать, о чем именно идет речь. В частности, очевидно, что расчетная емкость для определенных специфических условий далеко не всегда будет совпадать с номинальной, заложенной обычно в обозначении типа аккумулятора или указываемой в рекламных проспектах. А реальная емкость, полученная в результате испытания аккумуляторов на разряд, может не совпадать ни с номинальной, ни с расчетной. Понятно, что самую достоверную информацию о емкости можно получить только в результате испытания на разряд. Однако и здесь нас подстерегает сюрприз. Оказывается, в том же стандарте установлены и несколько различных видов испытаний:

- acceptance test (приемочные испытания) — контрактные испытания, предназначенные для подтверждения потребителем соответствия параметров аккумулятора (батареи) спецификации производителя;
- commissioning test (пуско-наладочные испытания) — испытания, проводимые в месте постоянной установки батареи аккумуляторов для подтверждения правильности монтажа и функционирования батареи;
- compliance test (испытание на соответствие) — испытание, предназначенное для демонстрации соответствия или несоответствия характеристик и свойств

аккумулятора (батареи) установленным требованиям;

- endurance test (испытание на долговечность) — испытание, проводимое по прошествии определенного интервала времени для оценки влияния условий эксплуатации на изменение характеристик и параметров аккумуляторов (батареи);
- laboratory test (лабораторные испытания) — испытания на соответствие (см. выше), проводимое при заранее установленных и контролируемых условиях, которые могут симулировать, а могут и не симулировать реальные условия эксплуатации;
- life test (испытание на срок службы) — испытание на установление срока службы аккумулятора (батареи) при установленных условиях;
- accelerated test (ускоренные испытания) — испытания, проводимые при утяжеленных (стрессовых) внешних условиях, превышающих установленные нормы и вызывающих сокращение долговечности, с целью определения влияния стрессовых условий на параметры и характеристики аккумуляторов или для сокращения времени испытания на долговечность;
- performance test (испытание характеристик) — испытание, проводимое с целью определения характеристик аккумулятора (АБ) и подтверждения того, что они способны выполнять возложенные на них функции;
- type test (типовые испытания) — испытания, подтверждающие характеристики

аккумулятора, проводимые на одном или нескольких образцах в процессе производства.

В дополнение к этим видам испытаний в американском стандарте IEEE 450-2002 [2] для открытых стационарных батарей (VLA) установлен еще один вид испытаний: service test (эксплуатационные испытания), определяемый, как испытание, проводимое для условий «как есть», то есть без корректировки разрядного тока по температуре и без учета возраста батареи. При этом необходимым условием испытаний является (как и для многих других видов испытаний, связанных с измерением емкости путем разряда) полная предварительная зарядка аккумуляторов. Эта так называемая «полная зарядка» осуществляется в режиме уравнительного заряда (equalize charging) при напряжении 2,3–2,4 В в течение 72 ч. Однако в стандарте IEEE 1188-2005 [3] на герметизированные аккумуляторы для стационарной установки (VRLA) отмечается, что при эксплуатационных испытаниях (service test) не требуется полная предварительная зарядка, если это требование специально не оговорено производителем данного типа аккумуляторов как нормальное периодическое эксплуатационное мероприятие. То есть емкость герметизированных аккумуляторов стационарной установки можно проверять в условиях «как есть», без корректировки разрядного тока и без предварительной «дозарядки».

Однако при этом следует учитывать, что если батарея аккумуляторов при таком испытании будет забракована по критерию минимально допустимой емкости (а это 80% от расчетной), то это еще не дает основания потребителю предъявлять претензии производителю. Для обоснования таких претензий должен быть проведен compliance, laboratory или performance test, естественно, при предварительной дозарядке аккумуляторов в режиме уравнительного заряда. Из этого становится очевидной важность понимания специфики того или иного вида испытаний применительно к тому или иному виду емкости.

Как уже отмечалось выше, критерием для отбраковки аккумуляторов является полученное при испытаниях значение реальной емкости (actual capacity) меньшее, чем 80% расчетной (rated capacity). Такой критерий отбраковки предусмотрен и в международных, и в американских, и в российском [4] стандартах.

В соответствии с [2, 3] формула для расчета емкости при разряде в режиме постоянного разрядного тока в течение более 1 ч имеет вид:

$$C = [t_A / (t_S \times K_T)] \times 100\%,$$

где: C — емкость аккумулятора (батареи) в процентах при температуре +25 °С; t_A — реальное время разряда аккумулятора до минимального допустимого значения напряжения; t_S — расчетное время разряда (режим разряда), выбранное из табличных данных производителя

Таблица 3. Разрядные характеристики аккумуляторов VRLA серии Marathon

Тип	Время разряда до конечного напряжения 1,75 В, ч														
	24	12	10	9	8	7	6	5	4	3	2,5	2	1,5	1	0,5
M12V30T	1,3	2,5	2,9	3,2	3,6	4,1	4,7	5,5	6,6	8,4	9,8	11,9	15,1	21,2	36,9
M12V40(F)	1,7	3,4	4,1	4,4	5	5,6	6,4	7,6	9,3	11,9	14	16,9	21,5	30,5	51,3
M12V45F	2,1	4	4,7	5,2	5,8	6,5	7,5	8,7	10,6	13,5	15,8	19,1	24	33,2	57,8
M12V70(F)	3,2	6,2	7,4	8,2	9,1	10,1	11,6	13,4	16,2	20,6	24	28,9	36,8	51,6	90,8
M12V90(F)	4,2	7,8	9,2	10,1	11,2	12,7	14,3	16,7	20,2	25,9	30,2	36,5	46,6	65,7	107
M6V190(F)	9,1	16,6	19,5	21,4	23,7	26,7	30,6	35,9	43,7	56	65,6	79,5	102	144,9	246
	Время разряда до конечного напряжения 1,85 В, ч														
	24	12	10	9	8	7	6	5	4	3	2,5	2	1,5	1	0,5
M12V30T	1,2	2,3	2,8	3,1	3,4	3,9	4,5	5,1	6,2	7,9	9,2	11,1	14,1	19,9	34
M12V40(F)	1,6	3,3	3,9	4,2	4,7	5,3	6,1	7,2	8,8	11,4	13,3	16	20,4	28,8	47,2
M12V45F	2	3,8	4,5	4,9	5,5	6,2	7,1	8,3	10	12,8	14,9	18	22,5	30,7	52
M12V70(F)	3	5,9	7	7,7	8,6	9,6	10,9	12,8	15,4	19,6	22,9	27,6	35,1	49,4	83
M12V90(F)	4	7,4	8,7	9,6	10,7	12	13,6	15,8	19,1	24,3	28,3	34,2	43,6	61,3	98
M6V190(F)	8,5	15,7	18,5	20,3	22,6	25,4	29,2	34,4	41,5	52,7	61,5	74,2	94,6	133,1	216,6
	Время разряда до конечного напряжения 1,94 В, ч														
	24	12	10	9	8	7	6	5	4	3	2,5	2	1,5	1	0,5
M12V30T	1	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,6	4,2	5,1	6,4	7,5	9	11,5	16,1	26,8
M12V40(F)	1,3	2,5	3	3,3	3,7	4,2	4,9	5,7	7	9,1	10,7	12,9	16,3	22,5	36,7
M12V45F	1,7	3,1	3,7	4,1	4,5	5,1	5,8	6,8	8,3	10,8	12,4	14,8	18,2	24,5	39,4
M12V70(F)	2,5	4,8	5,7	6,3	7	8	9	10,4	12,5	15,8	18,3	21,9	27,6	38,4	54,9
M12V90(F)	3,3	6,1	7,1	7,8	8,7	9,7	11,1	13	15,8	20,2	23,5	28,2	35,1	47,8	76,4
M6V190(F)	7	13	15,3	16,7	18,6	20,9	23,9	28,1	33,5	42,3	49	58,6	73,8	102,3	128,6

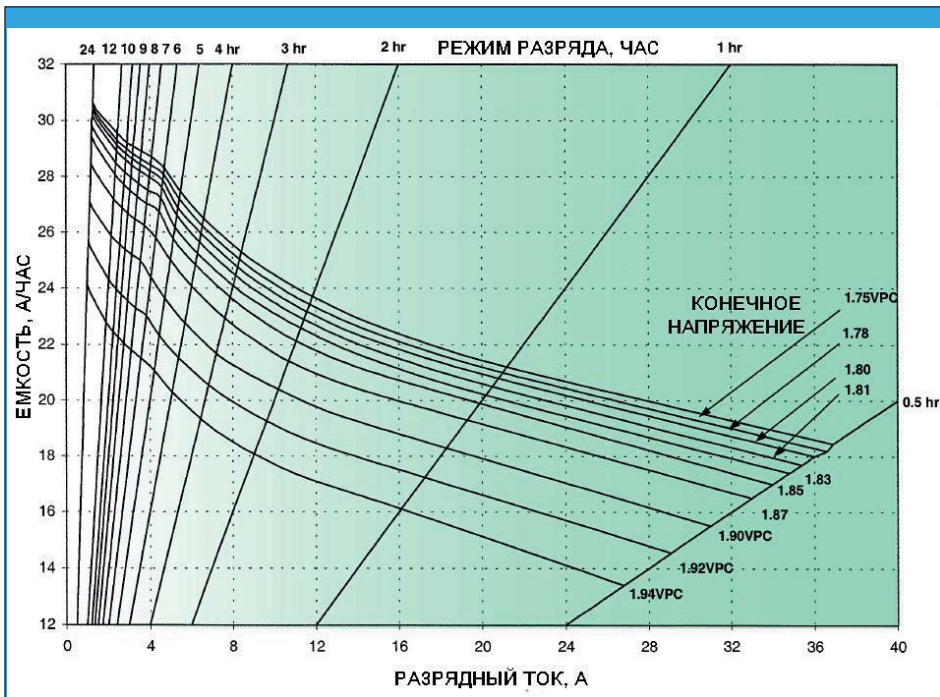


Рис. 10. Разрядные характеристики аккумулятора типа V12V30T в графическом виде

(таблица 3); K_T — поправочный коэффициент для температуры электролита перед началом разряда.

В таблице 3 приведены в качестве примера разрядные характеристики герметизированных аккумуляторов серии Marathon, по которым выбирается расчетное время разряда аккумулятора (режим разряда) в интервале 0,5–24 ч. По выбранному режиму и конечному напряжению разряда можно получить значение разрядного тока, которое нужно поддерживать постоянным. Время, в течение которого батарея была способна выдавать этот постоянный ток до того момента, когда ее напряжение упало до конечного напряжения разряда, и называется реальным временем разряда.

Иногда производители не ограничиваются одними лишь таблицами, а приводят разрядные характеристики в графическом виде (рис. 10), которые очень удобны для практического пользования и позволяют получить расчетные значения одних величин по выбранным другим.

Выбор аккумуляторов

При выборе наиболее пригодного для конкретной области применения аккумулятора необходимо руководствоваться следующими критериями выбора:

- режим разряда и отдаваемая при этом емкость;
- занимаемая площадь;
- срок службы;
- стоимость.

Типовая расчетная емкость аккумулятора указывается обычно для десятичасового режима разряда. Эта емкость обозначается C_{10} . При кратковременных режимах разряда коэффициент отдачи аккумуляторов по емкости

меньше единицы, то есть, эта емкость будет меньше, чем C_{10} , что связано с ограниченной скоростью протекания химических реакций на электродах. Меньшее снижение емкости при кратковременных разрядах (режим разряда один–три часа) дают аккумуляторы с поверхностными положительными электродами, а затем идут намазные. Аккумуляторы с панцирными положительными электродами наименее пригодны для коротких режимов разряда, поэтому при их выборе приходится использовать аккумуляторы с большим значением емкости для обеспечения необходимого резерва по емкости.

Следует иметь в виду, что, поскольку емкость аккумулятора определяется емкостью его анода (именно по этой причине и название типа аккумулятора определяется типом его положительной пластины), то некоторые производители указывают в технической документации емкость не аккумулятора, а положительного электрода.

По величине занимаемой площади преимущество имеют герметизированные аккумуляторы (VRLA). За ними в порядке возрастания требуемой для установки свободной поверхности следуют аккумуляторы открытых типов (VLA) с намазными электродами и панцирными электродами. Последнее место в этом списке занимают аккумуляторы с электродами Планте.

Самое большое влияние на срок службы герметизированного свинцово-кислотного аккумулятора оказывают: рабочая температура, глубина разряда и величина перезаряда (продолжительность зарядки при повышенном напряжении). С ростом любого из этих показателей срок службы аккумулятора заметно сокращается. Однако при соблюдении надлежащих правил эксплуатации самыми долговечными являются аккумуляторы с электро-



Рис. 11. Фрагмент подстанционной батареи на номинальное напряжение 230 В, состоящей из 106 последовательно соединенных свинцово-кислотных аккумуляторов с положительными электродами Планте

дами большой поверхности, для которых срок службы составляет 20–25 лет. Второе место занимают аккумуляторы с панцирными электродами — примерно 16–18 лет. Срок службы аккумуляторов с намазными электродами достигает 10–12 лет. Большинство герметизированных аккумуляторов с гелеобразным и абсорбированным электролитом обладают, как правило, меньшим сроком службы, но являются более дешевыми. По классификации европейского объединения производителей аккумуляторов EUROBAT герметизированные аккумуляторы подразделяются на четыре класса по характеристикам и сроку службы:

- более 12 лет;
- 10–12 лет;
- 6–9 лет;
- 3–5 лет.

Если использовать эти данные для выбора, например, стационарной батареи системы оперативного питания 220 В на электростанциях и подстанциях, то можно прийти к выводу, что для этой цели наиболее подходят аккумуляторы с положительными поверхностными электродами (рис. 11), тогда как для компактных агрегатов бесперебойного питания больше подходят герметизированные аккумуляторы (VRLA).

Литература

1. IEC 60896 Stationary lead-acid batteries. Part 21: Valve regulated types — Methods of test, 2004.
2. IEEE Std. 450-2002. IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications.
3. IEEE Std. 1188-2005. IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications.
4. ГОСТ 26881-86 «Аккумуляторы свинцовые стационарные. Общие технические условия». <http://vsegost.com/Catalog/19/19865.shtml>
5. DIN VDE 0510 P. 2. Vde Specification For Electric Storage Batteries And Battery Plants.