

УДК 621.355.2

УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ЗАРЯДА СВИНЦОВО-КИСЛОТНОГО АККУМУЛЯТОРА. 1. ГАЛЬВАНОСТАТИЧЕСКИЙ ЭТАП ЗАРЯДА

Ю. Б. Каменев, Г. А. Штомпель, Н. И. Чунц

Научно-технический центр ЗАО «Электротяга»,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Lushina@mail.whlus.net
Поступила в редакцию 23.06.11 г.

Предложена стратегия ускоренного режима заряда, включающая гальваностатический заряд до 80%-ной степени заряженности и импульсный заряд асимметричным током до полного заряда. В работе представлены результаты первого этапа исследования, посвященного изучению влияния режима гальваностатического заряда на ресурс свинцово-кислотных аккумуляторов. Показано различное влияние величины начального тока заряда на деградацию положительной и отрицательной активных масс и возможность заряда аккумулятора до 80%-ной степени заряженности за 0.5 ч.

Ключевые слова: свинцово-кислотный аккумулятор, высокоскоростной заряд, ресурсные испытания, гальваностатический заряд.

Strategy of the accelerated mode of the charge, including constant current charge to 80 % state-of-charge and a pulse charge by asymmetric current to a full charge is offered. Results of the first investigation phase devoted to studying of influence of a mode constant current charge on a resource of lead-acid accumulators are presented in this work. Various influence of size of an initial charge current on degradation of positive and negative active materials and possibility of charge of the accumulator to 80 % state-of-charge for 0.5 h is demonstrated.

Key words: lead-acid battery, high-rate charge, life cycle tests, constant current charge.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимальным режимом заряда следует считать заряд, при котором ток изменяется во времени по уравнению Вудбриджа [1]

$$I_3 = I_0 \cdot \exp(-\tau), \quad (1)$$

где I_0 – начальный ток, равный численно разрядной ёмкости аккумулятора $Q_{\text{РАЗ}}$ (А·ч). В течение всего заряда ток не должен превышать по своей величине остаточную разрядную ёмкость. Реализовать такое условие достаточно сложно технически, поэтому на практике используют многоэтапные режимы заряда.

Длительность заряда свинцово-кислотного аккумулятора до 100%-ной степени заряженности составляет в среднем 12–15 ч. В работах [2, 3] было показано, что продолжительность заряда определяется в основном зарядом от 90- до 100%-ной степени заряженности, что связано с крайне низкой эффективностью использования зарядного тока на этом этапе заряда (5–10%). Применение импульсных режимов заряда позволяет значительно ускорить заряд на последней стадии [4–6].

Нами рассмотрена стратегия ускоренного режима заряда свинцово-кислотных аккумуляторов, включающая два этапа. На первом этапе заряд проводится в гальваностатическом режиме и обеспечивается 80%-ная степень заряженности. Первый этап может включать 1–3 гальваностатические ступени со снижающимся током при переходе на каждую последующую ступень. Второй этап, обеспечивающий заряд от 80- до 100%-ной степени заряженности, проводится с применением импульсного асимметричного тока и обеспечивает полный заряд аккумулятора.

Известно положительное влияние интенсивного заряда в течение его начальной стадии на долговечность аккумуляторов [7–9]. Так, в работе Д. Павлова с соавт. [9] показано, что при увеличении зарядного тока с 0.2 до $1.5C_{\text{НОМ}}$ долговечность положительного электрода возрастает более чем в два раза. При этом показано, что высокие токи заряда следует применять до заряда 15% активной массы, которая и является ответственной за долговечность положительных пластин. Однако, с другой стороны, в работе [10] было установлено, что высокий начальный зарядный ток приводит к снижению ресурса отрицательной активной массы

(ОАМ), что связано с формированием в ней малоактивного сульфата свинца. Таким образом, режим заряда, на первом (гальваностатическом) этапе требует оптимизации его не только по времени, но и по ресурсу.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния режима гальваностатического заряда на его длительность и ресурс аккумуляторов.

Аккумуляторы испытывались в режиме непрерывного циклирования, включающего 2–4-ступенчатый гальваностатический заряд и разряд током 3-часового режима до конечного напряжения 1.60 В. Циклирование проводилось до достижения аккумуляторами 60%-ной номинальной ёмкости ($C_{НОМ}$), при этом делалась отметка ресурса при достижении 80%-ной номинальной ёмкости.

Ниже даны режимы гальваностатического заряда, использованные в работе:

Режим 1

1-я ступень: ток $1.5C_{НОМ}$ до конечного напряжения 2.45 В;
2-я ступень: ток $0.5C_{НОМ}$ до конечного напряжения 2.45 В;
3-я ступень: ток $0.2C_{НОМ}$ до 80% степени заряженности;
4-я ступень: ток $0.05C_{НОМ}$ до перезаряда 113%.

Режим 2

1-я ступень: ток $1.5C_{НОМ}$ до конечного напряжения 2.45 В;
2-я ступень: ток $0.5C_{НОМ}$ до 80% степени заряженности;
3-я ступень: ток $0.05C_{НОМ}$ до перезаряда 113%.

Режим 3

1-я ступень: ток $1.5C_{НОМ}$ до 80% степени заряженности;
2-я ступень: ток $0.05C_{НОМ}$ до перезаряда 113%.

Режим 4

1-я ступень: ток $0.5C_{НОМ}$ до конечного напряжения 2.45 В;
2-я ступень: ток $0.2C_{НОМ}$ до 80% степени заряженности;
3-я ступень: ток $0.05C_{НОМ}$ до перезаряда 113%.

Режим 5

1-я ступень: ток $0.5C_{НОМ}$ до 80% степени заряженности;
2-я ступень: ток $0.05C_{НОМ}$ до перезаряда 113%.

Режим 6

1-я ступень: ток $0.2C_{НОМ}$ до 80% степени заряженности;
2-я ступень: ток $0.05C_{НОМ}$ до перезаряда 113%.

Для испытаний было изготовлено 18 аккумуляторов 2СТ-140, по три на каждый режим заряда.

При изготовлении макетов использовали электроды аккумулятора 6СТ-140. Положительные электроды имели толщину 2.3 мм, отрицательные – 1.8 мм. Сепаратор имел толщину 1.4 мм. Габаритный размер электродов 143.0 x 132.5 мм. Положительные токоотводы отливались из сплава Pb-2.7%Sb-1.2%Sn-0.03%Se, а отрицательные – из сплава Pb-0.08%Ca-1.2%Sn.

Электродный блок состоял из 5 положительных и 6 отрицательных электродов.

Перед постановкой на ресурсные испытания все аккумуляторы прошли 10 тренировочных циклов, что позволило определить их номинальную ёмкость ($C_{НОМ}$).

После проведения тренировочных циклов макеты испытывали в режиме непрерывного циклирования путём чередования 9 прогоночных и контрольного циклов. Разряд прогоночного цикла проводили до 90% $C_{НОМ}$ током 8 А. Каждый 10-й цикл был контрольным. Контрольные разряды проводили также током 8А, до конечного напряжения 1.60 В. Все заряды проводили в соответствии с режимами, указанными выше. Аккумулятор снимался с испытаний, если его ёмкость при разряде составляла менее 60% от $C_{НОМ}$. Ресурс аккумулятора рассчитывался по достижению 80 и 60% от номинальной ёмкости. По результатам испытаний были построены зависимости изменения относительной ёмкости, потенциала положительного и отрицательного электродов в процессе циклирования.

После окончания испытаний все аккумуляторы подвергли разборке с целью оценки их состояния в конце срока службы.

В следующей работе будут рассмотрены результаты оптимизации параметров второго (импульсного) этапа ускоренного заряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена диаграмма, демонстрирующая влияние параметров режима гальваностатического заряда на ресурс (циклируемость) аккумуляторов. Из рисунка видно, что при использовании первого и второго режимов заряда циклируемость была минимальной, а при пятом режиме заряда – максимальной.

В табл. 1 представлены значения потенциалов положительного и отрицательного электродов в конце разряда для начала и конца испытаний на ресурс (здесь и далее потенциалы даны относительно кадмиевого электрода сравнения - электрода I рода с потенциалом -0.4 В относительно н.в.э.).

На рис. 2 показано изменение потенциалов положительного и отрицательного электродов в конце разряда в процессе циклирования в зависимости от режима заряда.

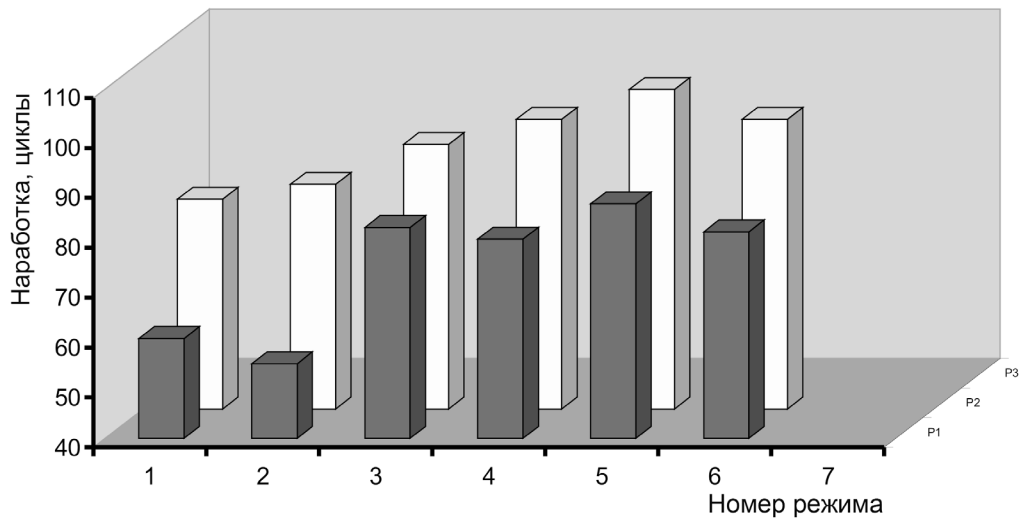


Рис. 1. Зависимость наработки макетов аккумуляторов до 80% (тёмные столбики) и 60% (светлые столбики) номинальной ёмкости от режима заряда

Потенциалы положительных и отрицательных электродов, В

Таблица 1

Режим заряда	Потенциал положительного электрода		Потенциал отрицательного электрода	
	Начало циклирования	Окончание циклирования	Начало циклирования	Окончание циклирования
1	2.10	2.05	0.13	0.40
2	2.10	2.02	0.14	0.40
3	2.10	1.94	0.15	0.35
4	2.10	1.78	0.17	0.17
5	2.10	1.85	0.20	0.21
6	2.05	1.75	0.14	0.15

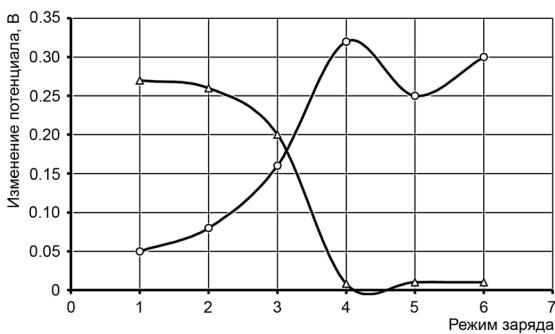


Рис. 2. Изменение потенциалов положительного (○) и отрицательного (Δ) электродов в конце разряда в процессе циклирования в зависимости от режима заряда

Из рисунка следует, что при использовании режимов 1–3 ресурс аккумуляторов определяется в первую очередь деградацией отрицательных электродов. При использовании режимов 4–6 наработка макетов определяется в первую очередь деградацией положительных электродов. Режимы 1–3 отличаются от режимов 4–6 использованием большего начального тока ($1.5C_{НОМ}$). Таким об-

разом, можно предполагать, что именно величина начального тока заряда определяет механизм ограничения ресурса аккумуляторов.

На рис. 3 представлен внешний вид положительных электродов после испытаний на наработку различными режимами.

Видно, что применение режимов заряда 4–6 способствует значительно большему оплыванию положительной активной массы, чем при использовании режимов 1–3. Что касается отрицательных электродов, то их фотографии не представлены, поскольку дают мало информации о деградации ОАМ. Однако при осмотре отрицательных пластин было отмечено, что при использовании режимов заряда 4–6 расширение (разбухание) ОАМ было заметно меньше, чем при использовании режимов заряда 1–3. Анализ состава ОАМ показал, что при использовании режимов заряда 1–3 содержание сульфата свинца в заряженных отрицательных электродах составлял 35–42%, что указывает на высокую степень сульфатации ОАМ. При исполь-

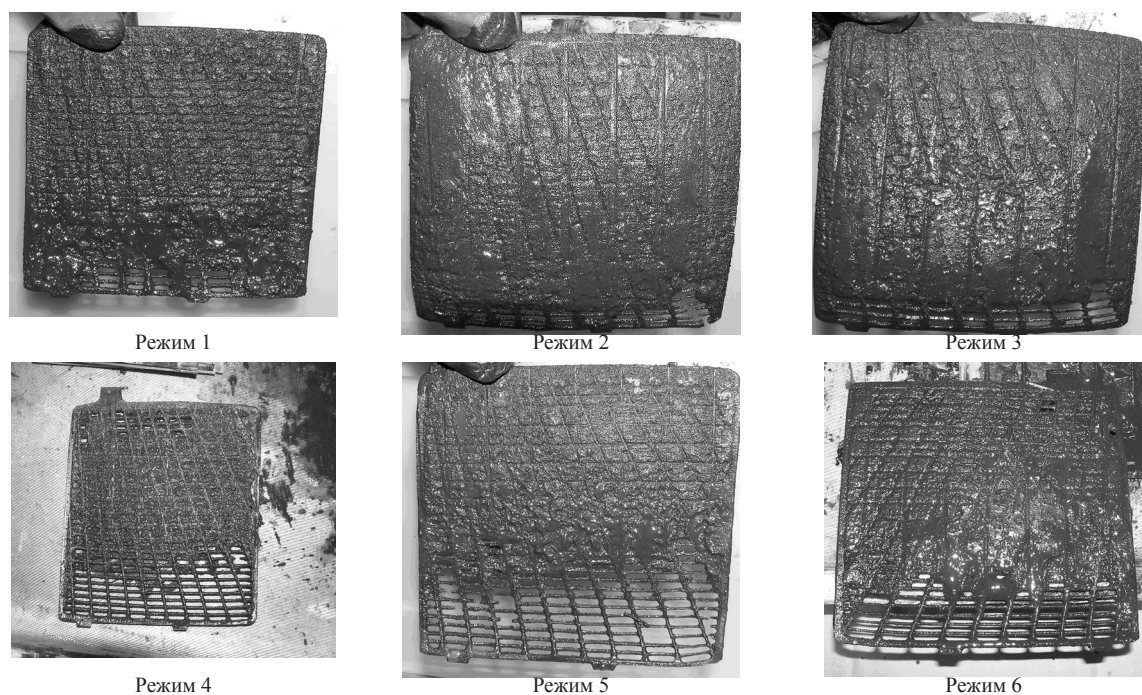


Рис. 3. Внешний вид положительных электродов после испытаний на ресурс в зависимости от режима заряда

зовании режимов 4-6 содержание сульфата свинца в заряженной ОАМ в конце срока службы составляло 18–21%. Таким образом, было дополнительно подтверждено, что применение режимов заряда с большим начальным током положительно влияет на сопротивление оплыванию ПАМ, но ухудшает структуру ОАМ. При относительно небольшом токе первой ступени оплывание ПАМ значительное, а разбухание и сульфатация ОАМ небольшие.

Из полученных результатов следует, что при высоких начальных токах заряда ресурс ПАМ увеличивается, а ОАМ, соответственно, снижается. И при относительно невысоких токах первой ступени заряда срок службы ОАМ увеличивается, а ПАМ – снижается.

Влияние величины тока заряда на срок службы ПАМ и ОАМ рассмотрено в работах [7–11].

В работах [7, 8] установлено, что большой ток заряда оказывает положительное влияние на разрядную ёмкость аккумуляторов, за счёт улучшения свойств ПАМ. В работе [9] показано, что срок службы положительного электрода пропорционален плотности тока на начальной стадии заряда. В этой же работе на основе проведённых импедансных измерений было также отмечено, что ёмкость положительного электрода ограничивается зонами высокого сопротивления в ПАМ на границе с токоотводом. Импедансные измерения по-

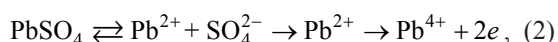
зволили установить, что при $I_1=0.2C_{\text{НОМ}}$ после 45 циклов сопротивление на границе токоотвод/ПАМ в два раза выше, чем для макетов, заряжаемых при $I_1=1.5C_{\text{НОМ}}$ после 130 циклов. То есть величина зарядного тока влияет, прежде всего, на структуру ПАМ на границе с токоотводом. Установлено [9], что кристаллы PbSO_4 , образованные на границе токоотвод/ПАМ окисляются с большим трудом. При этом они являются последними кристаллами PbSO_4 , которые превращаются в PbO_2 . Это и может быть причиной ограничения разрядной ёмкости (эффект PCL-1). Кристаллы PbSO_4 уменьшают число мостиков между ПАМ и контактным коррозионным слоем (CL), в результате чего затруднено протекание тока между ПАМ и токоотводом. Образование трещин в граничном слое приводит к аналогичному результату.

Наличие запирающего слоя на границе токоотвод/ПАМ наблюдается при низком содержании сурьмы в сплаве токоотвода. Сурьма, даже неравномерно распределённая по объёму ПАМ, стремится при циклировании концентрироваться на границе токоотвод/ПАМ. Это связано с тем, что, переходя в раствор, сурьма образует комплексы $[\text{SbOSO}_4]$, $[\text{Sb}_3\text{O}_9]$ [9]. Эти комплексы устойчивы при повышенных рН, что имеет место в глубине электродов, где локализован токоотвод. Сурьма замедляет скорость реакции разряда $\text{PbO}_2 \rightarrow \text{PbSO}_4$

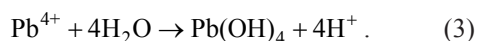
и способствует снижению содержания сульфата в граничном слое [11–12]. Кроме того, сурьма, образуя смешанные оксиды $Pb_{(1-x)}Sb_xO_2$, смещает потенциал PbO_2 в отрицательную сторону, что замедляет скорость образования сульфата свинца [12]. И наконец, сурьма повышает степень гидрирования PbO_2 , способствуя образованию гель-зон $PbO(OH)_2$. Гель-зоны снижают механические напряжения в граничных слоях, ответственные за растрескивания поверхностных оксидов [12].

ПАМ состоит из: 1) микроструктуры – частиц свинца, связанных в агломераты с микропорами между ними; 2) макроструктуры – агломератов, связанных в скелет, с макропорами между ветвями [13, 14]. Частицы PbO_2 состоят из кристаллических зон PbO_2 и гидратированных (гель) зон $PbO(OH)_2$ [15]. Неоднородность положительных пластин обусловлена неоднородностью пор и различной проводимостью ветвей ПАМ, которая зависит от их сечения и степени гидратирования. При циклировании могут создаваться условия (механические, химические) разрыва или повышения сопротивления отдельных ветвей. В процессе разряда всё большая часть ПАМ выводится из процесса, что повышает плотность тока на оставшихся активных участках и повышает поляризацию электрода до достижения конечного напряжения. Последние активные зоны («концевые» зоны), как правило, примыкают к границе токоотвод/ПАМ [16–18]. Резкое падение проводимости скелета ПАМ на конечной стадии разряда обусловлено потерей проводящего пути по электроду. Процесс разряда начинается с концевых зон, которые открывают путь процессу. Когда концевые зоны заряжены (имеют проводимость), процесс распространяется в глубь ПАМ. Сначала поляризация высокая, но по мере развития процесса она снижается.

Д. Павлов с соавт. [9] предложил следующий механизм влияния тока заряда на срок службы ПАМ. При увеличении интенсивности заряда увеличивается скорость образования ионов Pb^{4+} по реакции



которые взаимодействуют с водой с образованием $Pb(OH)_4$



Последние далее преобразуются в $PbO(OH)_2$,



с образованием гель-зон в структуре частиц PbO_2 . Скорость реакции (4) велика и поэтому $Pb(OH)_4$ не обнаруживается в пластинах в виде отдельной фазы. Однако соединения $PbO(OH)_2$ были зафиксированы экспериментально [18–21]. Концентрация $Pb(OH)_4$ определяет структуру ПАМ, а именно соотношение в ней кристаллических зон и гель-зон. При низких скоростях заряда концентрация $Pb(OH)_4$ мала и, следовательно, формирование гель-зон в агломератах низкое. Распределение их в скелете неоднородное. Прочность и проводимость ветвей скелета низкая. При высоких токах заряда концентрация $Pb(OH)_4$ велика. Он заполняет все поры, что приводит к равномерному распределению гель-зон и повышению эффективности разряда и прочности ветвей ПАМ [22].

Влияние тока заряда на ресурс ОАМ рассмотрено в работе [10]. В ней отмечено снижение ёмкости ОАМ при циклировании с использованием больших токов заряда. Это связано с неполным зарядом ОАМ и образованием в ней малоактивного сульфата свинца, что приводит к снижению скорости его восстановления до свинца при заряде.

Неактивный сульфат локализован внутри пластин, что можно объяснить на основе механизма восстановления сульфата свинца до свинца через растворение сульфата, скорость которого зависит от концентрации кислоты.

Если ток заряда начальной ступени велик, то концентрация кислоты в порах ОАМ быстро увеличивается и растворимость сульфата свинца снижается. Концентрация Pb^{2+} в объёме падает, реакция восстановления замедляется, и способность принимать заряд становится ниже.

Диффузия SO_4^{2-} зависит от структуры ОАМ. Сегодня для снижения оплывания ПАМ в открытых аккумуляторах и для обеспечения работы герметизированных аккумуляторов электродный блок сжимается с определенным усилием (50–70 кПа). Однако, если сжатие электродного блока позитивно влияет на работу положительного электрода, то сжатие ОАМ тормозит перенос SO_4^{2-} за счёт снижения среднего радиуса пор. Это будет отрицательно сказываться на скорости заряда при высо-

ких токах, что и делает сжатие ОАМ нежелательным. Сказанное выше позволяет говорить о том, что чем выше ток начальной ступени заряда, тем быстрее произойдет рост концентрации кислоты в порах и снижение скорости заряда. Процесс заряда будет вытесняться на периферию, а внутри ОАМ будет расти запас сульфата, что было отмечено при циклировании аккумуляторов с использованием режимов заряда 1–3.

Заряд большим током приводит также к увеличению скорости роста центров кристаллизации, что способствует формированию более мелких кристаллов и формирует ОАМ с меньшим средним радиусом пор. Это также повышает сопротивление переносу SO_4^{2-} из глубины электрода к внешним поверхностям и затрудняет протекание заряда.

Анализ результатов испытаний показал, что использование режима заряда 5 позволяет иметь наибольший срок службы аккумуляторов. Однако, учитывая цель работы, выбор режима заряда должен рассматривать не только его влияние на ресурс аккумуляторов, но и на длительность первого (гальваностатического) этапа заряда (заряд до 80%).

В табл. 2 показаны длительности этапов заряда и зарядная ёмкость, полученная аккумуляторами на каждом этапе заряда для режимов 1–6.

Из табл. 2 видно, что наименьшую длительность заряда до 80% обеспечивает режим 3 (0.54 ч), а из рис. 1 следует, что наибольшую наработку имели аккумуляторы, заряжаемые по режиму 5. При этом наработка макетов при заряде по режиму 3

Таблица 2

Параметры режимов заряда

Режим заряда	Степень заряда	Режим ступени заряда	Длительность ступени заряда, ч	Зарядная ёмкость ступени заряда, %
1	1	$I_1 = 1.5C_{\text{НОМ}}$ до $U=2.45$ В	0.17	23.7
	2	$I_2 = 0.5C_{\text{НОМ}}$ до $U=2.45$ В	0.88	41.8
	3	$I_3 = 0.2C_{\text{НОМ}}$ до 80%	0.56	14.5
	Этап 1		1.61	80.0
	4	$I_4 = 0.05C_{\text{НОМ}}$ до 115%	6.9	33.5
	Итого		8.51	113.5
2	1	$I_1 = 1.5C_{\text{НОМ}}$ до $U=2.45$ В	0.17	23.4
	2	$I_2 = 0.5C_{\text{НОМ}}$ до 80%	1.18	56.6
	Этап 1		1.35	80.0
	3	$I_3 = 0.05C_{\text{НОМ}}$ до 115%	7.08	33.6
	Итого		8.43	113.6
3	1	$I_1 = 1.5C_{\text{НОМ}}$ до 80%	0.54	80.0
	Этап 1		0.54	80.0
	2	$I_2 = 0.05C_{\text{НОМ}}$ до 115%	6.9	33.7
	Итого		7.5	113.7
4	1	$I_1 = 0.5C_{\text{НОМ}}$ до $U=2.45$ В	1.2	57.2
	2	$I_2 = 0.2C_{\text{НОМ}}$ до 80%	0.88	22.8
	Этап 1		2.08	80.0
	3	$I_3 = 0.05C_{\text{НОМ}}$ до 115%	7.0	33.4
	Итого		9.08	113.4
5	1	$I_1 = 0.5C_{\text{НОМ}}$ до 80%	1.72	80.0
	Этап 1		1.72	80.0
	2	$I_2 = 0.05C_{\text{НОМ}}$ до 115%	7.14	34.0
	Итого		8.79	114.0
6	1	$I_1 = 0.2C_{\text{НОМ}}$ до 80%	3,9	80.0
	Этап 1		3,9	80.0
	2	$I_2 = 0.05C_{\text{НОМ}}$ до 115%	6,94	34.0
	Итого		10,84	114.0

составляет 85% от наработки макетов, заряжавшихся по режиму 5.

На рис. 4 представлено изменение напряжения в процессе заряда токами 1.5 , 0.5 и $0.2C_{\text{НОМ}}$.

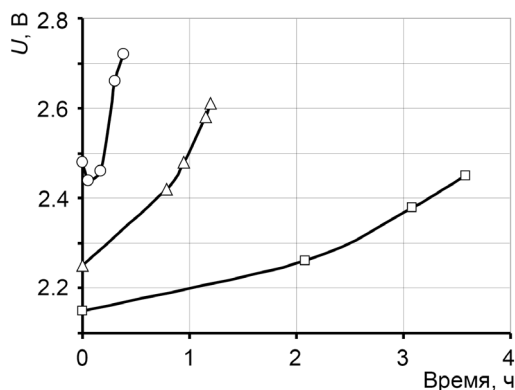


Рис. 4. Изменение напряжения в процессе заряда до 80%-ной степени заряженности макетов токами 1.5 (\circ), 0.5 (Δ) и $0.2C_{\text{НОМ}}$ (\square)

Из рисунка следует, что при заряде током $1.5C_{\text{НОМ}}$ напряжение начала газовыделения (2.45 В) достигается уже примерно через 0.17 ч. Далее имеет место рост напряжения, и процесс заряда идет со значительным газовойделением, приводящим к повышению газозаполнения аккумуляторов. Это может иметь негативное значение при использовании ускоренного режима заряда, например, применительно к аккумуляторам для подводных спасательных аппаратов, для которых использование ускоренного режима заряда, в условиях проведения аварийно-спасательных работ жизненно необходимо. Компенсационный объем таких аккумуляторов рассчитан на определенное их газозаполнение. Применение ускоренного режима заряда большим током и рост газозаполнения аккумуляторов требует выдержки аккумулятора после заряда, необходимой для удаления избыточного газа из аккумулятора. Такая выдержка снижает эффективность и целесообразность использования ускоренного заряда. При токе заряда $0.5C_{\text{НОМ}}$ напряжение 2.45 В достигается через примерно 0.9 ч, а при токе $0.2C_{\text{НОМ}}$ – через 3.6 ч.

Кроме того, высокая скорость газовойделения при токах заряда $1.5C_{\text{НОМ}}$ после достижения напряжения 2.45 В может быть причиной снижения ресурса аккумуляторов в результате воздействия пузырьков газа на ПАМ.

Таким образом, при выборе параметров первого (гальваностатического) этапа ускоренного заряда следует учитывать ряд факторов: 1) время заряда, 2) требуемый ресурс аккумуляторов, 3) критичность их газозаполнения. Следует также понимать, что ускоренные режимы заряда могут быть использованы только в период особых условий работы оборудования, например при проведении аварийно-спасательных работ. В другое время аккумуляторы можно заряжать обычным способом, что позволит повысить наработку аккумуляторов.

Полученные результаты позволяют рекомендовать два режима первого этапа заряда. Если наиболее важным является длительность заряда, то можно заряжать аккумулятор до 80%-ной степени заряда одной ступенью током $1.5C_{\text{НОМ}}$. В этом случае длительность заряда составит примерно 0.5 ч, а наработка будет иметь достаточно высокое значение. Если важно иметь наибольший ресурс аккумуляторов, то их можно заряжать током $0.5C_{\text{НОМ}}$. В этом случае длительность первого этапа заряда составит 1.7 ч, но наработка при этом будет максимальной. Негативное влияние ускоренного заряда на ресурс аккумуляторов может быть устранено периодическим проведением лечебных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен режим ускоренного заряда свинцово-кислотных аккумуляторов, включающий этап гальваностатического ступенчатого заряда до 80%-ной степени заряженности и последующий заряд импульсным асимметричным током до 100%-ной степени заряда.

В настоящей работе исследовано влияние режима гальваностатического заряда на ресурс (циклируемость) свинцовых аккумуляторов.

Испытания показали, что применение больших токов на первой ступени заряда способствует повышению ресурса ПАМ и снижению ресурса ОАМ, что подтверждает результаты работ Д. Павлова с соавторами.

Показана возможность заряда аккумулятора на первом этапе до 80%-ной степени заряженности за 0.5 ч при небольшом снижении ресурса аккумуляторов. Максимальный ресурс аккумуляторов был получен при длительности заряда на первом этапе 1.5 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азупф И. А., Дасоян М. А., Лызлов Н. Ю. Конструкция и условия эксплуатации герметичного свинцового аккумулятора. М. : Информэлектро, 1984.
2. Rand D. // Valve-Regulated Lead-Acid Batteries. Amsterdam; Boston; London : Elsevier, 2004,
3. Каменев Ю. Б., Лушина М. В., Васина И. А. // Электротехн. энергетика. 2008. Т. 8, № 3. С. 146–151.
4. James M., Grummet J., Rowan M. // J. Power Sources. 2006. Vol. 162. P. 878–883.
5. Lam L.T., Orgum H., Lim O.V. // J. Power Sources. 1995. Vol. 53. P. 215–228.
6. Kim S., Hong W. // J. Power Sources. 2000. Vol. 89. P. 93–101.
7. Valeriot T. M., Jochim D. M. // J. Power Sources. 1992. Vol. 40. P. 93–104.
8. Chang T. G., Valeriot T. M., Jochim D. M. // J. Power Sources. 1994. Vol. 48. P. 163–175.
9. Pavlov D., Petkova G., Dimitrov M. // J. Power Sources. 2000. Vol. 87. P. 39–56.
10. Pavlov D., Petkova G. // J. Power Sources. 2003. Vol. 113. P. 355–362.
11. Douglas D. L., Mao G. M. // J. Power Sources 4. Oriel, Newcastle-upon-Tyne. 1973. P. 561–567.
12. Pavlov D. // J. Power Sources. 1995. Vol. 53. P. 9–21.
13. Pavlov D. // J. Electrochem. Soc. 1984. Vol. 131. P. 1468–1476.
14. Pavlov D. // J. Electrochem. Soc. 1986. Vol. 133. P. 241–248.
15. Pavlov D., Balkanov B. // J. Electrochem. Soc. 1989. Vol. 136. P. 3189–3197.
16. Chang T. G., Bullock K. // J. Electrochem. Soc. 1984. Vol. 131. P. 1755–1761.
17. Bashtavelova E., Winsel A. // J. Power Sources. 1995. Vol. 53. P. 175–183.
18. Borger W., Hillmcinc U. // J. Power Sources 1989. Vol. 12. P. 131–138.
19. Pavlov D., Bashtavelova E. // J. Electrochem. Soc. 1990. Vol. 30. P. 7–14.
20. Feikneeht W. // J. Chem. Phys. 1984. Vol. 49. P. 135.
21. Skyllas-Kazacos M. // J. Power Sources. 1984. Vol. 13. P. 55–64.
22. Skyllas-Kazacos M. // J. Electrochem. Soc. 1981. Vol. 128. P. 817–820.