

УДК 621.355.2

## УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ЗАРЯДА СВИНЦОВО-КИСЛОТНОГО АККУМУЛЯТОРА. 2. ГАЛЬВАНОСТАТИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

Ю. Б. Каменев, Г. А. Штомпель, Ю. В. Скачков<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>*ФГУП «1-й ЦНИИ МО РФ», Санкт-Петербург, Россия*

E-mail: lushina@mail.wplus.net

Поступила в редакцию 26.04.13 г.

Рассмотрена стратегия ускоренного режима заряда свинцово-кислотных аккумуляторов, включающая гальваностатический заряд до 80%-ной степени заряженности и импульсный заряд до 100%. В работе изучены различные режимы одно — и двухступенчатого гальваностатического зарядов, и дана оценка влияния этих режимов на коэффициент эффективности заряда и разогрев аккумуляторов. Представлены данные, позволяющие обосновано выбрать режим первого этапа ускоренного заряда до 80%-ной степени заряженности.

*Ключевые слова:* свинцово-кислотный аккумулятор, высокоскоростной заряд, коэффициент эффективности заряда, гальваностатический заряд.

Strategy of the accelerated mode of the charge of the lead-acid batteries, including constant current charge to 80% state-of-charge and a pulse charge to 100% is considered. Various modes one — and two-stage constant current charges are studied in this work, and the estimation of influence of these modes on effectiveness ratio of a charge and a heat-up of batteries is yielded. The data, which allows reasonably choose the mode of the first stage of the accelerated charge to 80% state-of-charge, are presented.

*Key words:* lead-acid battery, high-rate charge, charge effectiveness ratio, constant current charge.

Продолжение (см. 2012. Т. 12, № 2. С. 64–71).

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из недостатков свинцово-кислотного аккумулятора является значительная длительность его заряда. В работах [1, 2] отмечается, что заряд до 80%-ной степени заряженности аккумулятора может быть проведён достаточно быстро. Основное время заряда приходится на заряд от 80 до 100%, когда эффективность заряда не превышает 5–10%. Принципиально существуют два направления сокращения длительности заряда: за счёт ограничения конечной степени заряженности на уровне 80–90%; за счёт ускорения заряда при применении новых алгоритмов. В работах [3, 4] показано, что эксплуатация свинцовых аккумуляторов в режиме постоянного недозаряда приводит к ускоренной их деградации, главным образом за счёт сульфатации отрицательной активной массы. В работах [5,6] была подтверждена возможность эксплуатации свинцовых аккумуляторов в условиях циклирования с постоянным недозарядом, что позволяет значительно сократить длительность их заряда.

В работе [7] нами был предложен режим ускоренного заряда, включающий этап гальваностатического заряда до степени заряженности 80% и этап заряда импульсным током. Было показано, что выбор тока гальваностатической ступени влияет не только на продолжительность гальваноста-

тического заряда, но и на срок службы свинцовых аккумуляторов. При этом величина тока по-разному влияет на срок службы положительной (ПAM) и отрицательной (ОAM) активных масс. Так, в работах Д. Павлова с соавторами [8, 9] было показано, что рост зарядного тока значительно увеличивает срок службы ПAM и снижает срок службы ОAM.

Применение импульсного тока, по мнению авторов работ [10–12], позволяет значительно ускорить заряд до 100%-ной степени заряженности.

Настоящая работа посвящена изучению влияния режима гальваностатического заряда до 80%-ной степени заряженности на эффективность и длительность последнего.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### *Одноступенчатый гальваностатический заряд*

В работе использовали макеты свинцово-кислотных аккумуляторов с номинальной ёмкостью  $C_{20}$  равной 9–10 А·ч (СКА-10). Заряд проводили одноступенчатым постоянным током в диапазоне 0.5–1.5 $C_{20}$ .

На рис. 1 показано изменение напряжения на макетах аккумуляторов в процессе одноступенчатого гальваностатического заряда токами 0.5 $C_{20}$ ; 0.8 $C_{20}$ ; 1.2 $C_{20}$  и 1.5 $C_{20}$ . Заряд проводили после 10-часового разряда до конечного напряжения 1.80 В.

При этом макеты получали (по расчёту) 80%-ной зарядной ёмкости.

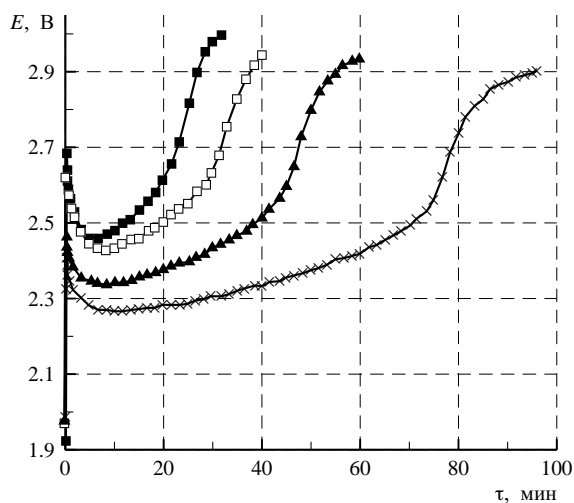


Рис. 1. Изменение напряжения в процессе одноступенчатого гальваностатического заряда в зависимости от тока заряда. Ток заряда: 0.5 (x), 0.8 (▲), 1.2 (□) и 1.5  $C_{20}$  (■)

В процессе заряда кривая напряжение/время изменяется следующим образом:

- 1) после начала заряда напряжение резко возросло; при этом величина скачка напряжения увеличивалась с ростом тока заряда (этап 1);
- 2) после скачка напряжение снижалось, достигая минимума (этап 2);
- 3) пройдя минимум, напряжение начинает возрастать со скоростью, зависящей от величины тока заряда (этап 3);
- 4) по мере проведения заряда происходит переход формы кривой изменения напряжение/время от выпуклой к вогнутой (этап 4);
- 5) далее напряжение стремится к некоторому постоянному значению, величина которого зависит от тока заряда (этап 5).

Известно, что напряжение ( $E_{зар}$ ) в процессе заряда описывается уравнением

$$E_{зар} = E_{нрц} + \sum \Delta E + I_{зар} \cdot \sum R_{вн}, \quad (1)$$

где  $E_{нрц} = d + 0.84$  — напряжение разомкнутой цепи,  $d$  — плотность кислоты, численно выраженная в вольтах,  $\Delta E$  — суммарная поляризация положительных и отрицательных электродов,  $I_{зар}$  — ток заряда,  $R_{вн}$  — суммарное внутреннее сопротивление.

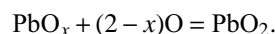
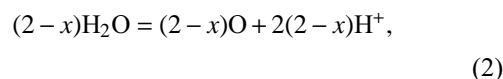
Характер кривых  $E_{зар}$ - $\tau$  (см. рис. 1) может быть проанализирован с помощью уравнения (1). Начальный рост напряжения (этап 1) связан с высоким внутренним сопротивлением аккумулятора за счёт значительного содержания сульфата свинца

в активных материалах и низкой концентрации кислоты. Кроме того, для начального момента заряда характерна высокая поляризация электродов из-за низкой контактной поверхности между разряженной активной массой и токопроводящими элементами электрода ( $S_{конт}$ ), что определяет высокие значения плотности тока и поляризации соответственно. Из формулы (1) видно, что чем выше ток заряда, тем значительнее второй и третий члены уравнения (1) и, соответственно, выше  $E_{зар}$ .

По мере протекания заряда постепенно увеличивается величина  $S_{конт}$ , что снижает плотность зарядного тока и поляризацию электродов ( $\Delta E$ ). Кроме того, снижается внутреннее сопротивление макета за счёт уменьшения сопротивления активных масс и роста проводимости электролита в процессе заряда, связанного с повышением его концентрации. Все это приводит к наблюдаемому снижению напряжения в процессе заряда.

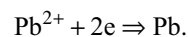
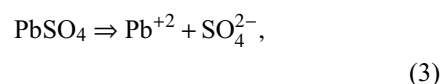
Далее, по мере протекания заряда, напряжение начинает возрастать. Так как рост напряжения происходит на фоне снижения сопротивления активных масс и электролита, то отмеченный факт следует связать с ростом  $E_{нрц}$  и увеличением поляризации ( $\Delta E$ ). Рост  $E_{нрц}$  определяется увеличением плотности кислоты в процессе разряда.

Рост поляризации положительного электрода определяется тем, что к началу этапа 3 завершено формирование диоксида свинца на поверхности разряженной активной массы. Далее процесс распространяется в глубь агломератов положительной активной массы  $PbO_x$ , через слой  $PbO_2$ . Процесс заряда положительной активной массы идёт по твёрдофазному механизму по реакции  $PbO_x \rightarrow PbO_2$ . Скорость этого процесса зависит от скорости переноса кислорода в зону реакции. Упрощённо можно записать это схематично:



Учитывая то, что по мере заряда диффузионный путь переноса кислорода возрастает, для поддержания постоянной скорости заряда (постоянство зарядного тока) необходимо возрастание напряжения.

Рост поляризации отрицательного электрода имеет иной механизм. При заряде отрицательной активной массы протекают следующие процессы:



Первая стадия — химическая, скорость её зависит от концентрации серной кислоты. Вторая стадия — электрохимическая. Скорость процесса в целом определяется скоростью растворения сульфата свинца, растворимость которого снижается по мере роста концентрации кислоты при заряде. Таким образом, по мере заряда перенапряжение процесса восстановления сульфата свинца до губчатого свинца будет возрастать. Соотношение влияния различных факторов в итоге будет приводить к росту напряжения на этапе 3 заряда.

На этапе 4 происходит изменение характера кривой  $E_{зар} - \tau$ , что связано с перераспределением зарядного тока между токообразующим процессом и процессом выделения кислорода в пользу последнего.

И наконец, на последнем этапе напряжение постепенно стремится к постоянному значению. Выход на постоянное значение напряжения указывает на резкое снижение эффективности использования зарядного тока и расходование практически всего зарядного тока на процесс разложения воды, величина напряжения которого определяется плотностью тока на электродах.

Из рис. 1 видно, что длительность передачи макетам 80%-ной зарядной ёмкости при токах  $1.5C_{20}$ ,  $1.2C_{20}$ ,  $0.8C_{20}$  и  $0.5C_{20}$  составляет примерно 30, 40, 60 и 95 мин.

После проведения одноступенчатого гальваностатического заряда, для оценки фактического уровня заряженности, макеты разряжались током 20-часового режима. Полученные результаты позволили определить коэффициент эффективности заряда, значения которого даны в табл.1. Коэффициент эффективности заряда (КЭЗ) определялся как

$$КЭЗ = \frac{Q_{факт}}{I_1 \cdot \tau_1}, \quad (4)$$

где  $Q_{факт}$  — фактическая зарядная ёмкость, оцениваемая по результатам контрольного разряда,  $I_1$ ,  $\tau_1$  — токи и длительности 1-й ступени заряда соответственно.

Таблица 1

Коэффициенты использования зарядного тока

Ток заряда, $C_{20}$	Фактическая ёмкость, % $C_{20}$	Переданная зарядная ёмкость, % $C_{20}$	Коэффициент эффективности заряда
1.5	59.7	79.5	0.76
1.2	64.8	80.1	0.81
0.8	67.0	80.0	0.83
0.5	70.3	80.0	0.88

Из табл. 1 видно, что по мере роста тока заряда в диапазоне  $0.5 \div 1.5C_{20}$  коэффициент эффективности заряда снижается в диапазоне  $0.88 \div 0.76$ .

На практике принято использовать значение напряжение 2.45 В в качестве переходного, при достижении которого следует либо снизить ток гальваностатического заряда, либо перейти на заряд при постоянном напряжении. Выше этого значения напряжения в аккумуляторе начинается заметное газовыделение на электродах. Ранее проведённые нами бародинамические исследования [13] показали, что при напряжениях 2.40–2.45 В при гальваностатическом заряде имело место начало роста внутреннего давления в аккумуляторах, что подтверждает ранее сказанное.

Из рис. 1 следует, что минимальное напряжение при токах заряда  $1.5C_{20}$  и  $1.2C_{20}$  составляло примерно 2.45–2.48 В. При токах  $0.8C_{20}$  и  $0.5C_{20}$  зарядная ёмкость до достижения переходного напряжения 2.45В составляла 20.5 и 47.6%  $C_{20}$  соответственно.

Другой важной характеристикой процесса заряда является нагрев аккумуляторов. На рис. 2 показана зависимость роста температуры аккумулятора от тока заряда и его длительности. Температура измерялась на стенке аккумуляторов. Предварительные измерения показали, что температура стенки аккумулятора отличается не более чем на  $1-2^\circ$  от температуры электролита в нём.

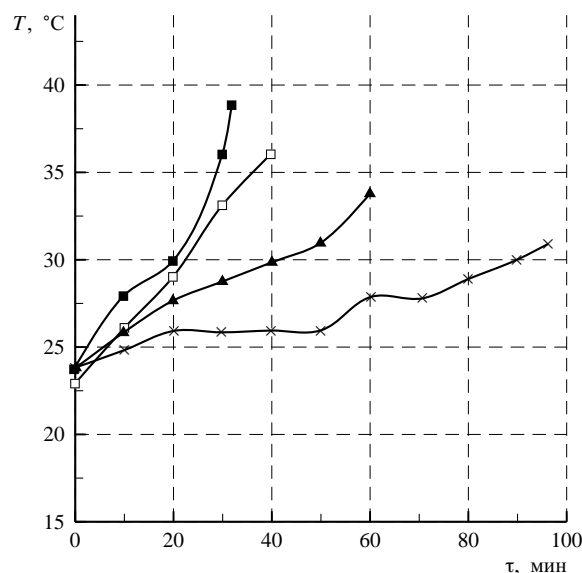


Рис. 2. Зависимость нагрева аккумуляторов в процессе заряда от величины зарядного тока и длительности заряда. Зарядный ток: 0.5 (x), 0.8 (▲), 1.2 (□) и  $1.5C_{20}$  (■)

Из рисунка видно, что при токе заряда  $1.5C_{20}$ , к моменту достижения 80%-ной зарядной ёмкости, аккумулятор нагревается до  $39^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 15^\circ$ ), при

токе заряда  $1.2C_{20}$  — до  $36^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 12^\circ$ ), при токе заряда  $0.8C_{20}$  — до  $34^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 10^\circ$ ) и при токе заряда  $0.5C_{20}$  — до  $31^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 7^\circ$ ).

С целью подтверждения полученных на макетах результатов были проведены одноступенчатые гальваностатические заряды аккумуляторов 2СТ-140 (номинальная ёмкость 140 А·ч). На рис. 3 показано изменение напряжения в процессе такого заряда макетов СКА-10 и аккумуляторов 2СТ-140 токами 0.5 и  $1.5C_{\text{ном}}$ .

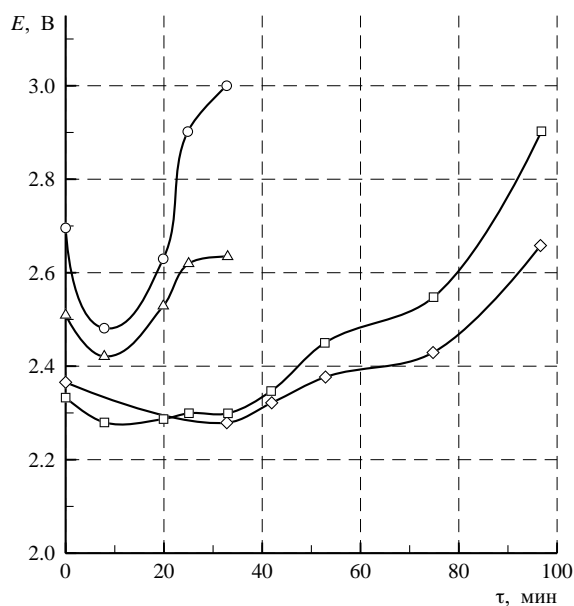


Рис. 3. Изменение напряжения в процессе заряда до 80%-ной степени заряженности макетов СКА-10 (○, □) и аккумуляторов 2СТ-140 (△, ◇) токами  $1.5C_{20}$  (○, △) и  $0.5C_{20}$  (□, ◇)

Видно, что характер рассматриваемых зависимостей качественно подобный, но отличен по количественным параметрам. Различия заключаются в том, что в конце заряда до 80% напряжение на макете СКА-10 при токе  $1.5C_{20}$  равно 3 В, а на аккумуляторе 2СТ-140 — 2.63 В. На рис. 4 показано изменение температуры макета СКА-10 и аккумулятора 2СТ-140 в процессе заряда током 1.5 С до 80%-ной степени заряженности.

Видно, что макеты аккумуляторов СКА-10 имели значительно меньший разогрев в процессе заряда, чем аккумуляторы 2СТ-140. Известно, что разогрев аккумулятора определяется соотношением тепловыделения ( $Q_{\text{ген}}$ ) и теплоотвода ( $Q_{\text{дисс}}$ ), а также теплоёмкостью аккумулятора ( $c_{p,\text{акк}}$ ) в соответствии с соотношением (5) [14]

$$dT = \frac{1}{c_{p,\text{акк}}} (dQ_{\text{ген}} - dQ_{\text{дисс}}). \quad (5)$$

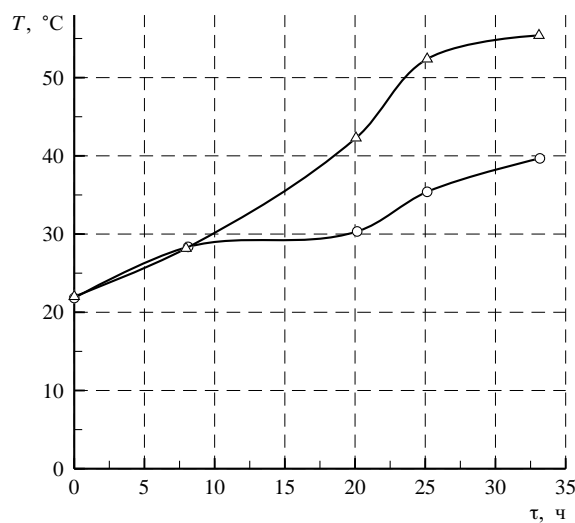


Рис. 4. Изменение температуры макета СКА-10 (○) и аккумулятора 2СТ-140 (△) в процессе заряда током  $1.5C_{20}$  до 80%

При этом тепловыделение условно пропорционально объёму аккумулятора, т. е. третьей степени его размера, а теплоотвод, соответственно, поверхности аккумулятора, т. е. второй степени его размера. Большой разогрев аккумуляторов 2СТ-140 связан с меньшей величиной их относительной удельной поверхности, с которой происходит теплоотвод генерированного в аккумуляторе тепла. Из формулы (5) также видно, что разогрев аккумулятора зависит от теплоёмкости аккумулятора, которая определяется значениями теплоёмкости его компонентов. При этом теплоёмкость электролита значительно превосходит теплоёмкости других компонентов аккумулятора. Так, теплоёмкость свинца равна 128 Дж/кг·К, а кислоты 2900 Дж/кг·К. Аккумуляторы СКА-10 имели больший относительный запас кислоты. И наконец, тепловыделение зависит от внутреннего сопротивления аккумулятора.

Таким образом, меньший разогрев макетов СКА-10 связан с относительно большей площадью удельной поверхности, большим относительным запасом кислоты в аккумуляторе и меньшим внутренним сопротивлением.

В конце заряда на 80% большая часть тока расходуется на разложение воды, и напряжение определяется перенапряжением выделения кислорода и водорода на электродах. При больших токах заряда ( $1.5C_{20}$ ) оно может быть значительным. Температура является деполаризатором реакций выделения кислорода и водорода. Рост температуры будет приводить к снижению напряжения при заряде.

В табл. 2 даны основные характеристики одноступенчатого гальваностатического заряда макетов СКА-10 до 80%-ной степени заряда.

Таблица 2

Основные характеристики одноступенчатого гальваностатического заряда макетов СКА-10

№	Ток заряда, $C_{20}$	Длительность, мин	Коэффициент эффективности заряда, %	Разогрев $\Delta, ^\circ C$
1	1.5	31,4	76	15
2	1.2	40,0	81	13
3	0.8	60,0	83	10
4	0.5	95,7	88	7

Таким образом, заряд одноступенчатым гальваностатическим режимом до 80%-ной степени заряженности отличается относительно низким коэффициентом использования зарядного тока и значительным разогревом. Попытка улучшить эти параметры приводит к увеличению длительности заряда.

*Двухступенчатый гальваностатический заряд*

С целью повышения эффективности гальваностатического заряда рассмотрен 2-ступенчатый режим заряда токами на первой ступени  $0.5 \div 1.5C_{20}$  до напряжения 2.45 В и далее током  $0.5C_{20}$  до 80%-ной степени заряда.

На рис. 5 показано изменение напряжения при заряде макетов СКА-10 2-ступенчатыми гальваностатическими режимами:

- 1)  $1.5C_{20}$  до 2.45 В +  $0.5C_{20}$  до 80% (режим 1);
- 2)  $1.2C_{20}$  до 2.45 В +  $0.5C_{20}$  до 80% (режим 2);
- 3)  $0.8C_{20}$  до 2.45 В +  $0.5C_{20}$  до 80% (режим 3);
- 4)  $0.5C_{20}$  до 2.45 В +  $0.5C_{20}$  до 80% (режим 4).

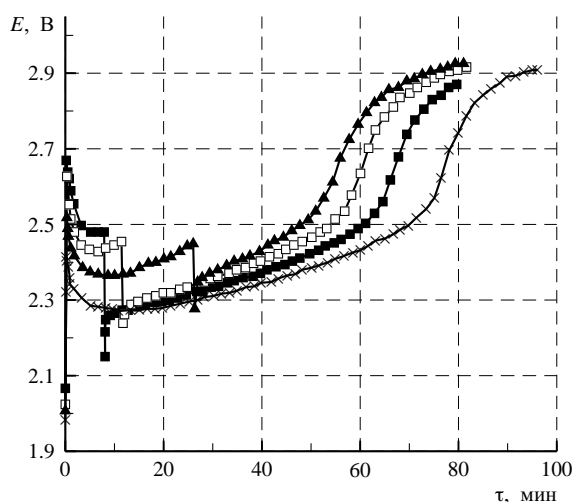


Рис. 5. Изменение напряжения при заряде 2-ступенчатыми гальваностатическими режимами: ■ —  $1.5C_{20}$  до 2.45 В +  $0.5C_{20}$  до 80%; □ —  $1.2C_{20}$  до 2.45 В +  $0.5C_{20}$  до 80%; ▲ —  $0.8C_{20}$  до 2.45 В +  $0.5C_{20}$  до 80%; × —  $0.5C_{20}$  до 2.45 В +  $0.5C_{20}$  до 80%

В табл. 3 показаны значения ёмкости макетов СКА-10 при заряде их токами  $0.5-1.5C_{20}$  до достижения напряжения 2.45 В в зависимости от величины тока заряда первой ступени, а также длительность такого заряда и уровень достигаемой относительной ёмкости. Из таблицы следует, что при увеличении тока заряда на первой ступени с  $0.5$  до  $1.5C_{20}$  относительная зарядная ёмкость снижается с 52 до 20.6%.

После заряда макетов 2-ступенчатым режимом они были разряжены до конечного разрядного напряжения с целью оценки фактической зарядной ёмкости, полученной ими при заряде режимами 1–4 и оценки эффективности зарядов по указанным режимам. КЭЗ оценивался как

$$КЭЗ = \frac{Q_{факт}}{I_1 \cdot \tau_1 + I_2 \cdot \tau_2}, \quad (6)$$

где  $Q_{факт}$  — фактическая зарядная ёмкость, оцениваемая по результатам контрольного разряда,  $I_1, I_2, \tau_1, \tau_2$  — токи и длительности 1-й и 2-й ступени заряда соответственно. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 3

Характеристики 1-й ступени заряда

Ток заряда 1 ступени, $C_{20}$	Зарядная ёмкость до достижения 2.45 В, А·ч	Время заряда до достижения 2.45 В, мин	Полная зарядная ёмкость, А·ч	Относительная ёмкость 1 ступени заряда, %
1.5	1.90	8.2	9.2	20.6
1.2	2.14	11.6	9.2	23.3
0.8	3.62	27.0	10.2	35.5
0.6	5.10	50.0	10.2	50.0
0.5	5.27	62.0	10.2	52.0

Таблица 4

Эффективность зарядов по режимам 1–4

Режим заряда	Переданная зарядная ёмкость, %	Фактическая ёмкость, %	Коэффициент эффективности заряда
1	80.0	75.3	0.94
2	82.9	79.2	0.96
3	82.5	75.8	0.92
4	80.0	74.9	0.94

На основании полученных данных был проведён расчёт длительности 2-ступенчатых зарядов до 80%-ной степени заряженности. Данные расчёта представлены в табл. 5.

Таблица 5

Длительность зарядов по режимам 1-4

Режим заряда	Длительность 1 ступени заряда, ч	Длительность 2 ступени заряда, ч	Общая длительность заряда, ч
1	0.14	1.19	1.33
2	0.19	1.13	1.32
3	0.44	0.86	1.30
4	1.03	0.57	1.60

Из данных, приведённых в таблице, видно, что в пределах изменения тока первой ступени  $(1.5 \div 0.8)C_{20}$  общая длительность заряда практически не изменяется. Однако при снижении тока первой ступени ниже  $0.8C_{20}$  длительность заряда до 80% заметно увеличивается.

На рис. 6 показано изменение температуры макетов в процессе их заряда режимами 1 и 4. Видно, что изменение температуры мало зависит от режима заряда. Так, при заряде по режиму 1 температура макета возросла на  $5^{\circ}\text{C}$ . При этом основной разогрев произошёл на 1 ступени заряда (ток  $1.5C_{20}$ ). При заряде по режиму 4 аккумуляторы повысили температуру на  $7^{\circ}\text{C}$ . Некоторое повышение конечной температуры макета, заряжаемого по второму режиму, может быть связано с большей длительностью заряда и/или повышенным сопротивлением макета.

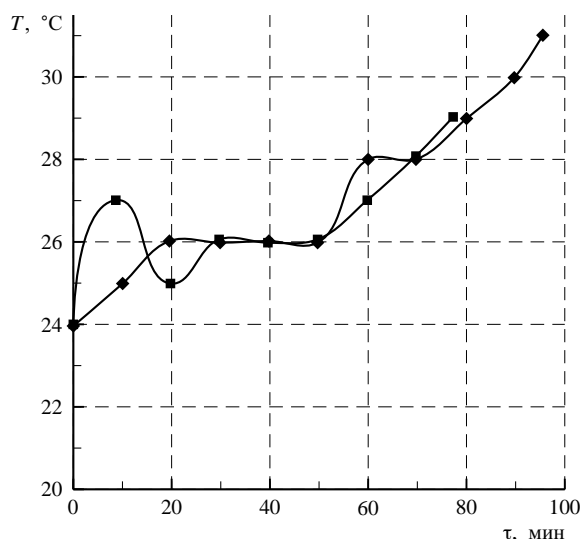


Рис. 6. Изменение температуры макетов в процессе заряда режимами 1 (■) и 4 (◆)

В табл. 6 даны основные характеристики 2-ступенчатого гальваностатического заряда макетов СКА-10 до 80%-ной степени заряда.

Таблица 6

Основные характеристики 2-ступенчатого гальваностатического заряда макетов СКА-10

Режим заряда	Длительность заряда, ч	Коэффициент эффективности заряда	Разогрев $\Delta$ , $^{\circ}\text{C}$
1	1.33	0.94	5
2	1.32	0.96	5
3	1.3	0.92	6
4	1.60	0.94	7

Видно, что 2-ступенчатый режим заряда имеет преимущества перед одноступенчатым зарядом по таким параметрам, как коэффициент эффективности заряда и разогрев, что позволит иметь достаточно большой срок службы аккумуляторов и низкий уровень их обслуживания в процессе эксплуатации.

Ранее в работе [7] нами было показано, что наименьшим ресурсом обладали аккумуляторы, имевшие ток на первой ступени  $1.5C_{ном}$ , а наибольшим — аккумуляторы, имевшие ток на первой ступени  $0.5C_{ном}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен алгоритм ускоренного заряда свинцово-кислотного аккумулятора, включающего этап гальваностатического заряда до 80%-ной степени заряженности и этап заряда импульсным током до полного заряда аккумулятора.

Изучены различные режимы одноступенчатого и двухступенчатого гальваностатического зарядов и дана оценка влияния этих режимов на коэффициент эффективности заряда и разогрев аккумуляторов. Полученные данные позволяют сделать обоснованный выбор режима первого этапа ускоренного заряда до 80%-ной степени заряженности.

В последующих работах предполагается представить результаты по выбору параметров импульсного ускоренного заряда свинцовых аккумуляторов с 80 до 100%-ной степени заряженности.

Продолжение следует.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rand D.* Valve-Regulated Lead-Acid Batteries, Amsterdam; Boston; London: Elsevier, 2004.
2. *Ikeya T., Savada N., Takagi S.* // J. Power Sources. 2000. Vol. 91. P. 130-136.
3. *Moseley P. T.* // J. Power Sources. 2004. Vol. 127. P. 27-32.
4. *Catherino H., Feres F.* // J. Power Sources. 2004. Vol. 129. P. 113-120.

5. *Каменев Ю. Б., Луцина М. В., Васина И. А.* // Электрохим. энергетика. 2008. Т. 8, № 3. С. 146–151.
6. *Каменев Ю. Б., Чуңц Н. И., Леонов В. Н., Штомпель Г. А.* // Электрохим. энергетика. 2011. Т. 11, № 1. С. 33–38.
7. *Каменев Ю. Б., Штомпель Г. А., Чуңц Н. И.* // Электрохим. энергетика. 2012. Т. 12, № 2. С. 64–71.
8. *Pavlov D., Petkova G., Dimitrov M.* // J. Power Sources. 2000. Vol. 87. P. 39–56.
9. *Pavlov D., Petkova G.* // J. Power Sources. 2003. Vol. 113. P. 355–362.
10. *James M., Grummet J., Rowan M.* // J. Power Sources. 2006. Vol. 162. P. 878–883.
11. *Lam L. T., Orgum H., Lim O. V.* // J. Power Sources. 1995. Vol. 53. P. 215–228.
12. *Kim S., Hong W.* // J. Power Sources. 2000. Vol. 89. P. 93–101.
13. *Kamenev Yu., Chunts N.* // J. Power Sources. 2002. Vol. 108. P. 58–63.
14. *Berndt D.* Maintenance-Free Batteries. New York: Research Studies Press Ltd.; John Wiley & Sons Inc., 1997.