

УДК 621.355.2

**УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ЗАРЯДА СВИНЦОВО-КИСЛОТНОГО АККУМУЛЯТОРА.
3. ИМПУЛЬСНЫЙ ЗАРЯД****Ю. Б. Каменев, Г. А. Штомпель***Научно-технический центр ЗАО «Электротяга», 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 исследовано влияние на эффективность заряда и разогрев аккумуляторов основных параметров импульсного заряда: амплитуды и длительности зарядного импульса, длительности паузы, общей продолжительности импульсного заряда.

Ключевые слова: свинцово-кислотный аккумулятор, высокоскоростной заряд, разогрев аккумуляторов, импульсный 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. Influence of key parameters of a pulse charge (amplitude and duration of charge pulse, duration of a pause, the general duration of a pulse charge) on the efficiency of a charge and a heat-up of batteries are studied in this work.

Key words: lead-acid battery, high-rate charge, heat-up of batteries, pulse charge.

Продолжение (см. 2013. Т. 13, №2. С. 70–76).

ВВЕДЕНИЕ

Одним из существенных недостатков свинцово-кислотных аккумуляторов является длительность их заряда. При этом основное время затрачивается на заряд от 80 до 100%-ной степени заряженности аккумулятора, т. е. на заключительную стадию заряда. В работах [1–3] показано, что применение импульсного режима заряда значительно сокращает его продолжительность. Кроме того, снижение длительности последней ступени заряда в гальваностатическом режиме позволяет: 1) снизить скорость газовыделения на 20–30% и, соответственно, сократить потери воды; 2) увеличить разрядную ёмкость; 3) снизить выделение аэрозолей кислоты; 4) уменьшить скорость коррозии токоотводов; 5) снизить степень необратимой сульфатации электродов; 6) сократить расходы на обслуживание батарей.

По мнению авторов работ [1–3], положительный эффект от применения импульсного тока связан с его влиянием на структуру активных масс и степень её кристалличности. Кроме того, импульсный заряд позволяет снижать ионный дисбаланс в аккумуляторе и уменьшать температуру последнего.

При заряде постоянным током на последней ступени образуются крупные кристаллы активной массы, что снижает величину её поверхности. При пульсирующем токе потенциал электрода выше, что увеличивает скорость образования новых зарядышей кристаллов и способствует измельчению

структуры активной массы. Кроме того, во время паузы на поверхности кристаллов адсорбируются различные ионы, что повышает перенапряжение роста кристаллов и способствует формированию новых центров кристаллизации.

По данным Д. Павлова [4], при заряде активной массы в ней формируются как кристаллические, так и аморфные (гель) зоны. Последние во многом обеспечивают работоспособность активной массы за счёт их высокой протонной проводимости и снижения сопротивления контакта между агломератами активной массы. Длительный заряд при постоянном токе повышает степень кристалличности активной массы и нарушает оптимальное соотношение между кристаллическими и гель зонами.

В процессе импульсного заряда во время паузы диффузия оптимизирует распределение ионов в объёме электролита, что позволяет реализовывать повышенные плотности тока заряда. Во время паузы происходит диссипация тепла. Снижение температуры повышает перенапряжение выделения газов, снижает образование аэрозолей кислоты, уменьшает скорость коррозии токоотводов и, в конечном итоге, повышает срок службы аккумулятора.

В работе [5] нами был предложен алгоритм ускоренного заряда, включающий гальваностатический заряд до 80%-ной степени заряженности и последующий заряд импульсным током до полного заряда аккумулятора.

В настоящей работе рассмотрен импульсный заряд свинцового аккумулятора, имеющего 80%-ную начальную степень заряженности. Алгоритм импульсного заряда представлял собой чередование

зарядных импульсов и пауз. В работе исследовалось влияние амплитуды и длительности зарядного импульса, а также продолжительности паузы на эффективность процесса заряда.

1. МЕТОДИКА

В соответствии с предложенным алгоритмом ускоренного заряда после гальваностатического этапа, на котором аккумуляторы получают 80% зарядной ёмкости, проводили заряд импульсным током путём чередования зарядного импульса с паузой. В настоящей работе параметры импульсного заряда изменялись в следующих диапазонах: 1) амплитуда зарядного импульса ($I_{зи}$): $0.1 \div 1.1 C_{ном}$; 2) длительность зарядного импульса ($t_{зи}$): $20 \div 1500$ мс; 3) длительность паузы ($t_{пауз}$): $50 \div 2000$ мс.

Испытания проводили на макетах аккумуляторов с номинальной ёмкостью $8 \div$ А·ч. Размеры электродов $80 \times 50 \times 4.1$ мм, счёт сборки 2(+)/3(-). Плотность кислоты 1.28 г/см³. Испытания проводили при комнатной температуре.

Предварительно макеты циклировали для набора аккумуляторами ёмкости с целью установления её номинального значения. За номинальную ёмкость ($C_{ном}$) принималась ёмкость 10 часового разряда. При циклировании на набор ёмкости аккумуляторы заряжали 3 ступенчатым режимом заряда и разряжали до конечного напряжения 1.80 В. Всего проводили $10-20$ подготовительных циклов до контрольного разряда, на котором определялась номинальная ёмкость.

После определения номинальной ёмкости проводили исследование влияния параметров $I_{зи}$, $t_{зи}$, $t_{пауз}$ и t (общее время заряда) на разрядную ёмкость аккумуляторов. При исследовании каждого из указанных параметров остальные параметры имели постоянное значение.

Общий алгоритм испытания включал:

1) заряд 3-ступенчатым гальваностатическим режимом: ток 1 ступени $0.5 C_{ном}$, до напряжения 2.45 В; ток 2 ступени $0.2 C_{ном}$, до напряжения 2.45 В; ток 3 ступени $0.05 C_{ном}$, до напряжения 2.6 В (коэффициент перезаряда $1.06-1.12$); общая длительность заряда примерно 5 ч;

2) 1-й контрольный разряд током $0.1 C_{ном}$ до конечного напряжения 1.80 В.

3) заряд 3-ступенчатым гальваностатическим режимом (п.1);

4) разряд током $0.1 C_{ном}$ на 20% (остаточная степень заряженности 80%);

5) заряд импульсным режимом с заданными параметрами $I_{зи}$, $t_{зи}$, $t_{пауз}$; время заряда $20-50$ мин;

6) 2-й контрольный разряд током $0.1 C_{ном}$ до конечного напряжения 1.80 В.

Для обеспечения представленного выше алгоритма испытаний были использованы автоматизированные зарядно-разрядные устройства АЗРИВК2-15А-18В и УЗРИ-5А-18В, а также импульсные потенциостаты ELINS P-150I.

Испытания при каждом наборе параметров проводили не менее $2-3$ раз. Далее строили зависимость влияния каждого параметра на относительную разрядную ёмкость и выбирали его оптимальное значение. В процессе испытания проводились измерения напряжения на клеммах макета и температуры стенки аккумулятора. Предварительно было установлено, что в условиях испытаний температура стенки макета практически равна температуре электролита в аккумуляторе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Влияние амплитуды зарядного импульса

В настоящей работе исследовалось влияние амплитуды зарядного импульса на эффективность заряда. Амплитуда зарядного импульса изменялась в диапазоне $0.1 \div 1.1 C_{ном}$. Длительность зарядного импульса составляла 200 мс, длительность паузы — 50 мс, общее время заряда $20-50$ мин.

На рис. 1 представлена зависимость относительной разрядной ёмкости аккумуляторов от амплитуды зарядного импульса. Видно, что зависимость $C = f(I_{зи})$ носит экстремальный характер.

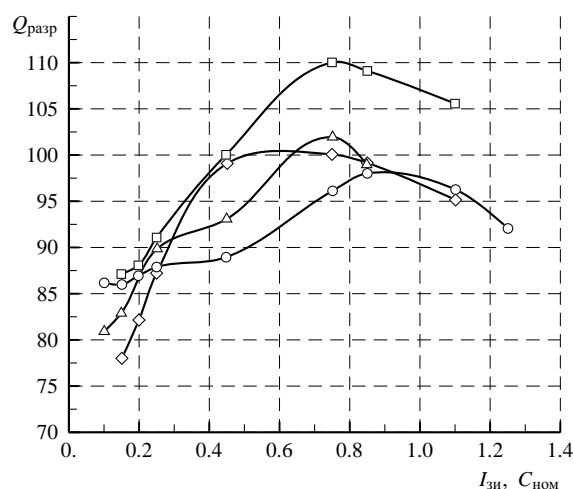


Рис. 1. Зависимость относительной разрядной ёмкости макетов от амплитуды зарядного импульса. Длительность импульсного заряда 20 (\circ), 30 (Δ), 50 мин (ёмкость приведена к 20 °С) (\diamond). Параметры заряда: $t_{зи} = 200$ мс, $t_{пауз} = 50$ мс

Превышение разрядной ёмкости уровня 100% связано с разогревом аккумуляторов в процессе импульсного заряда. На рис.2 показано изменение температуры макетов в процессе импульсного заряда в зависимости от величины тока зарядного импульса. Известно, что разрядная ёмкость свинцового аккумулятора возрастает при росте его температуры. На рис. 1 показана зависимость относительной разрядной ёмкости макета от величины тока зарядного импульса при реальной температуре испытаний и та же зависимость после приведения ёмкости к 20°C. Видно, что после приведения разрядной ёмкости к 20°C её значение не превышает 100%.

Таким образом, было показано, что зависимость относительной ёмкости макета от величины тока зарядного импульса носит экстремальный характер с максимумом в диапазоне $0.7 \div 0.8 C_{\text{ном}}$. Это указывает на наличие, как минимум, двух факторов, противоположно влияющих на рассматриваемую зависимость. Для оценки зарядной ёмкости ($Q_{\text{зар}}$) можно записать

$$Q_{\text{зар}} = k \cdot I_{\text{зи}} \cdot t_{\text{зи}} \cdot \nu \cdot t, \quad (1)$$

где k — коэффициент использования зарядного тока, определяющий долю зарядного тока, идущего на токообразующий процесс; $\nu = \frac{1}{t_{\text{зи}} + t_{\text{пауз}}}$ — частота импульсного тока, $I_{\text{зи}}$. Далее можно записать, что

$$Q_{\text{зар}} = k \cdot I_{\text{зи}} \cdot t \cdot t_{\text{зи}} \cdot \frac{1}{t_{\text{зи}} + t_{\text{пауз}}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует очевидный факт, что с ростом тока зарядного импульса зарядная ёмкость должна возрастать, что и наблюдается при $I_{\text{зи}}$, принадлежащем диапазону $(0 \div 0.75) C_{\text{ном}}$. Однако зависимость эта не линейна, так как не весь ток зарядного импульса идёт на заряд аккумулятора. Часть тока зарядного импульса идёт на процессы газовой выделения ($I_{\text{газ}}$). Этот ток зависит от степени заряженности аккумулятора (θ) и величины тока импульсного заряда, т. е. $I_{\text{газ}} = F(\theta, I_{\text{зи}})$. В работе [6] показано, что в диапазоне 80–100%-й степени заряженности, т. е. в диапазоне импульсного заряда, эффективность заряда значительно снижается с ростом степени заряженности аккумулятора.

Для коэффициента использования тока можно записать, что $k = I_{\text{зар}} / I_{\text{зи}}$, где $I_{\text{зар}} = I_{\text{зи}} - I_{\text{газ}}(\theta, I_{\text{зи}})$ — ток, идущий непосредственно на заряд аккумулятора. Тогда

$$Q_{\text{зар}} = \frac{[I_{\text{зи}} - I_{\text{газ}}(\theta, I_{\text{зи}})] \cdot t_{\text{зи}} \cdot t}{t_{\text{зи}} + t_{\text{пауз}}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что зависимость зарядной ёмкости от параметров импульсного заряда носит сложный, неоднозначный характер. Это

связано с тем, что ток, идущий непосредственно на заряд аккумулятора, зависит от: 1) степени заряженности аккумулятора; 2) величины тока зарядного импульса; 3) длительности зарядного импульса; 4) длительности паузы между зарядными импульсами. Таким образом, с ростом тока зарядного импульса, при достижении им определённого уровня, эффективность заряда должна снижаться по следующим причинам. Во-первых, с ростом тока заряда возрастает температура аккумулятора, как показано на рис. 2, что приводит к снижению перенапряжения газовых процессов и уменьшению эффективности использования зарядного тока. Во-вторых, с ростом тока заряда, при снижении запаса непрореагировавшей активной массы, происходит рост плотности зарядного тока и, соответственно, рост поляризации электродов.

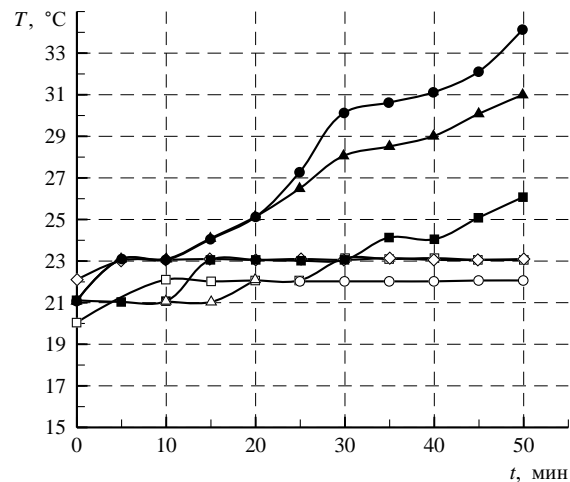


Рис. 2. Изменение температуры макета в процессе импульсного заряда при амплитуде зарядного импульса 0.10 (о), 0.15 (Δ), 0.20 (□), 0.25 (◇), 0.45 (■), 0.75 (▲) и 1.10 $C_{\text{ном}}$ (●). Параметры заряда: $t_{\text{зи}} = 200$ мс, $t_{\text{пауз}} = 50$ мс

На рис. 3 показано изменение напряжения аккумуляторов в процессе импульсного заряда в зависимости от тока зарядного импульса. Видно, что при малых токах ($0.1 \div 0.15 C_{\text{ном}}$) напряжение в процессе заряда изменяется незначительно в пределах 2.2 ÷ 2.4 В. При токе импульсного заряда $0.20 \div 0.25 C_{\text{ном}}$ напряжение растёт в пределах 2.3 ÷ 2.5 В в течение 30 мин. Затем происходит заметный рост напряжения с 2.5 до 2.8 В за 20 мин, т. е. скорость роста напряжения возрастает с 0.0067 до 0.015 В/мин. Рост напряжения указывает на возрастающую роль процесса газовой выделения на электродах. При токе $0.45 C_{\text{ном}}$ напряжение быстро возрастает со средней скоростью 0.3 В/мин в течение примерно 20 мин и затем стремиться к постоянному значению на уровне 2.98 В. При токе $0.75 C_{\text{ном}}$, напряжение растёт в диапазоне 0–10 мин со скоростью 0.65 В/мин и достигает предельного

значения 3.06 В. И наконец, при токе $1.1C_{\text{НОМ}}$ напряжение достигает предельного значения 3.10 В через примерно 10 мин. Таким образом, чем выше ток заряда, тем быстрее макет выходит на режим работы, когда практически весь зарядный ток идёт на выделение водорода и кислорода.

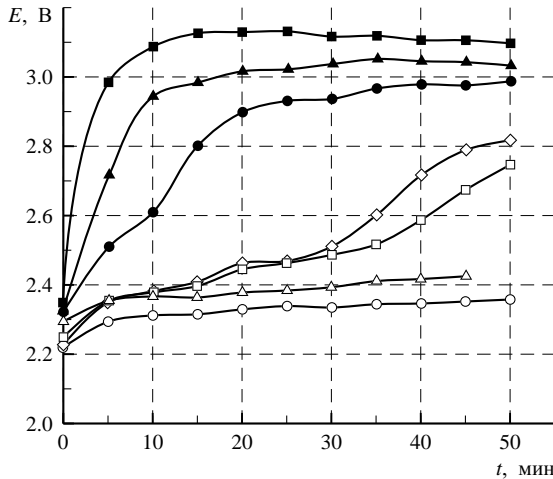


Рис. 3. Изменение напряжения в процессе импульсного заряда. Ток импульсного заряда: 0.10 (○), 0.15 (△), 0.20 (□), 0.25 (◇), 0.45 (●), 0.75 (▲) и 1.10 $C_{\text{НОМ}}$ (■). Параметры заряда: $t_{\text{зи}} = 200$ мс, $t_{\text{пауз}} = 50$ мс

Зависимость напряжения при достижении им постоянного значения как функции логарифма тока зарядного импульса, построенная для трёх значений тока 0.45, 0.75 и 1.10 $C_{\text{НОМ}}$, носит линейный характер, что подтверждает сказанное выше.

Таким образом, для импульсного режима заряда, когда $t_{\text{зи}} = 200$ мс, $t_{\text{пауз}} = 50$ мс, зависимость времени импульсного заряда от величины тока зарядного импульса приблизительно соответствует: при $0.25C_{\text{НОМ}}$ — более 50 мин; при $0.45C_{\text{НОМ}}$ — примерно 20 мин; при $0.75C_{\text{НОМ}}$ — примерно 15 мин; при $1.1 C_{\text{НОМ}}$ — примерно 10 мин.

2.2. Влияние длительности зарядного импульса

Влияние длительности зарядного импульса изучалось при $I_{\text{зи}} = 0.45C_{\text{НОМ}}$, $t_{\text{пауз}} = 50$ мс. При этом длительность зарядного импульса изменялась в диапазоне 50–1500 мс.

Из уравнения (3) вытекает неявная зависимость зарядной ёмкости от длительности зарядного импульса. С одной стороны, с увеличением времени зарядного импульса должна возрастать длительность заряда, но, с другой стороны, при сохранении длительности паузы снижается количество зарядных импульсов за период заряда. В дифференциальной форме зависимость зарядной ёмкости от длительности зарядного импульса можно записать как

$$dQ_{\text{зар}} = I_{\text{зар}} \cdot v \cdot t \cdot dt_{\text{зи}} \quad (4)$$

Решая уравнения (4) при начальных условиях $t_{\text{зи}} = 0$, $Q_{\text{зар}} = 0$, получим:

$$dQ_{\text{зар}} = I_{\text{зар}} \cdot \frac{t}{t_{\text{зи}} + t_{\text{пауз}}} dt_{\text{зи}}, \quad (5)$$

$$Q_{\text{зар}} = I_{\text{зар}} \cdot t \cdot \ln(t_{\text{зи}} + t_{\text{пауз}}) + c, \quad (6)$$

$$Q_{\text{зар}} = I_{\text{зар}}(\theta, I_{\text{зи}}) \cdot t \cdot \ln\left(1 + \frac{t_{\text{зи}}}{t_{\text{пауз}}}\right). \quad (7)$$

Таким образом, из уравнения (7) вытекает, что с ростом длительности зарядного импульса зарядная ёмкость должна возрастать с постоянным замедлением скорости роста ($Q_{\text{зар}} = f(\ln t_{\text{зи}})$).

На рис. 4 представлена зависимость относительной разрядной ёмкости макетов от длительности зарядного импульса ($t_{\text{зи}}$) и продолжительности импульсного заряда (t). Видно, что разрядная ёмкость макетов непрерывно возрастает в диапазоне длительности зарядного цикла 50–1000 мс. Однако, при значительном увеличении длительности зарядного импульса (выше 1000 мс) наблюдается некоторое снижение разрядной ёмкости. Можно предположить, что такое снижение связано с уменьшением эффективности зарядного тока за счёт увеличения доли тока зарядного импульса, идущей на газовыделение

$$Q_{\text{зар}} = (I_{\text{зи}} - I_{\text{газ}}(\theta)) \cdot t \cdot \ln\left(1 + \frac{t_{\text{зи}}}{t_{\text{пауз}}}\right), \quad (8)$$

где θ — степень заряженности аккумулятора.

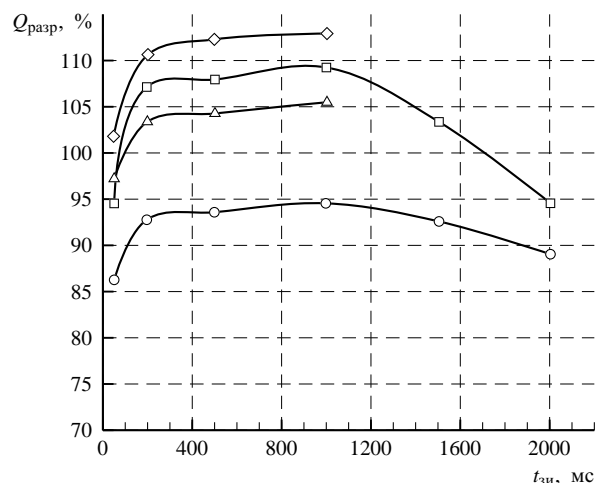


Рис. 4. Зависимость относительной разрядной ёмкости от длительности зарядного импульса. Параметры импульсного заряда: ○ — $I_{\text{зи}} = 0.45C_{\text{НОМ}}$, $t_{\text{пауз}} = 50$ мс, $t = 20$ мин; △ — $I_{\text{зи}} = 0.45C_{\text{НОМ}}$, $t_{\text{пауз}} = 50$ мс, $t = 30$ мин; □ — $I_{\text{зи}} = 0.45C_{\text{НОМ}}$, $t_{\text{пауз}} = 50$ мс, $t = 50$ мин (макет 1); ◇ — $I_{\text{зи}} = 0.45C_{\text{НОМ}}$, $t_{\text{пауз}} = 50$ мс, $t = 50$ мин (макет 2)

На рис. 5 представлена зависимость изменения напряжения макета от длительности зарядного импульса и продолжительности импульсного заряда. Видно, что через определённый период заряда наступает момент, когда практически весь ток идёт на разложение воды, о чём свидетельствует постоянство напряжения во времени. На основании данных приведённых на рис. 5, может быть получена зависимость времени достижения постоянно напряжения разложения воды от длительности зарядного импульса. Такая зависимость позволяет определить длительность импульсного заряда как функцию длительности зарядного импульса. Так, для длительностей зарядного импульса 50, 200, 500 и 1000 мс последняя составляет 60, 35, 25 и 20 мин соответственно.

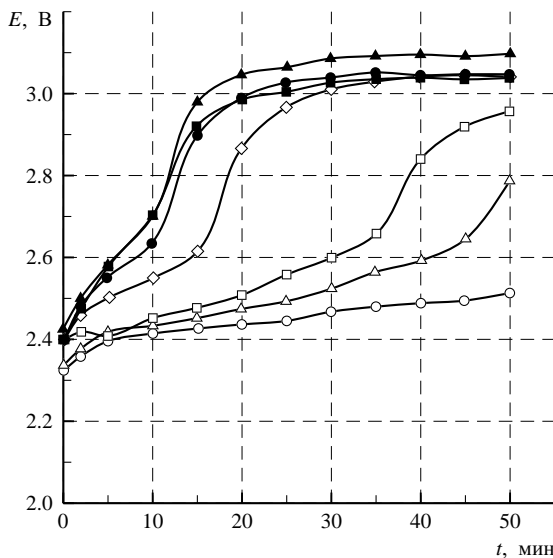


Рис. 5. Зависимость напряжения в импульсе заряда от длительности зарядного импульса. Длительность зарядного импульса: 20 (○), 35 (△), 50 (□), 200 (◇), 500 (●), 1000 (▲) и 1500 мс (■). Параметры заряда: $I_{зи} = 0.45C_{ном}$; $t_{пауз} = 50$ мс

На рис. 6 показана зависимость температуры аккумулятора в процессе заряда от длительности зарядного импульса и продолжительности импульсного заряда. Видно, что чем больше продолжительность импульсного заряда, тем значительнее рост температуры. Увеличение температуры, в свою очередь, приводит к снижению перенапряжения газовых процессов и уменьшению эффективности использования зарядного тока. Всё это в соответствии с уравнением (8), способствует снижению разрядной ёмкости из-за уменьшения зарядной ёмкости.

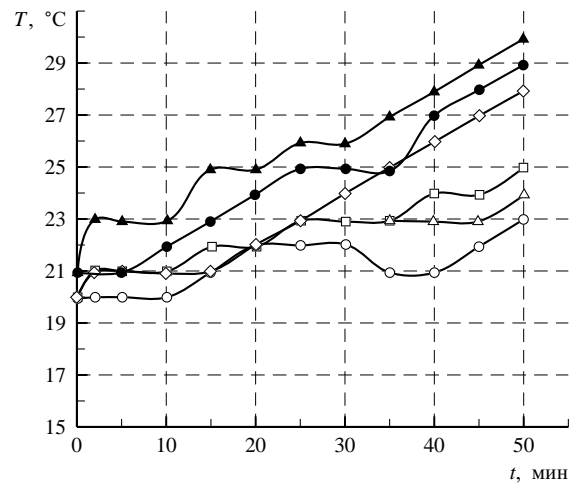
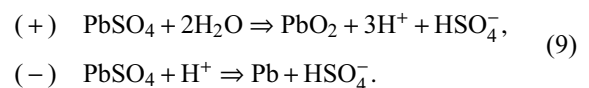


Рис. 6. Зависимость температуры макета в процессе заряда от длительности зарядного импульса и времени импульсного заряда. Длительность зарядного импульса: 20 (○), 50 (△), 200 (□), 500 (●), 1000 мс (◇), 1500 мс (▲). Параметры заряда: $I_{зи} = 0.45C_{ном}$; $t_{пауз} = 50$ мс

2.3. Влияние длительности паузы

Следует ожидать, что применение паузы при заряде должно повышать эффективность использования зарядного тока, что позволит повысить амплитуду тока зарядного импульса. Повышение эффективности использования зарядного тока связано с диссипацией тепла в паузе и охлаждением аккумулятора при заряде. Снижение температуры способствует росту перенапряжения газовых процессов, что повышает эффективность использования зарядного тока. Кроме того, при заряде постоянным током имеет место рост концентрации кислоты в положительном и отрицательном электродах в соответствии с реакциями (9):



Диффузия кислоты при относительно больших зарядных токах не успевает снизить рост её концентрации, что приводит к снижению эффективности заряда положительной активной массы, так как для этой реакции оптимальным является использование разбавленной кислоты. Рост плотности кислоты приводит к повышению перенапряжения зарядных реакций, росту поляризации электродов и напряжения аккумулятора. При этом повышается скорость выделения кислорода и снижается эффективность заряда положительного электрода. При импульсном заряде во время паузы происходит снижение концентрации кислоты за счёт диффузионных процессов, что повышает эффективность последующего зарядного импульса и позволяет увеличить его амплитуду. Таким образом, выбор длительности паузы

является важным этапом оптимизации режима заряда.

На рис. 7 показана зависимость разрядной ёмкости от длительности паузы и продолжительности импульсного заряда. Следует учитывать, что увеличение паузы, с одной стороны, снижает температуру аккумулятора и концентрацию кислоты в зоне реакции, но, с другой стороны, снижает суммарную длительность зарядного процесса при постоянстве времени импульсного заряда. Из рис. 7 видно, что увеличение длительности паузы при постоянстве продолжительности заряда приводит к снижению степени заряженности макетов, что связано с уменьшением суммарной длительности заряда. Однако в области относительно невысоких длительностей паузы (0–100 мс) была отмечена экстремальная зависимость $Q_{\text{разр}} = f(t_{\text{пауз}})$ с максимумом в области 50–100 мс. Очевидно, что в этом диапазоне, при величине используемого тока зарядного импульса 200 мс, и находится оптимальное значение продолжительности паузы.

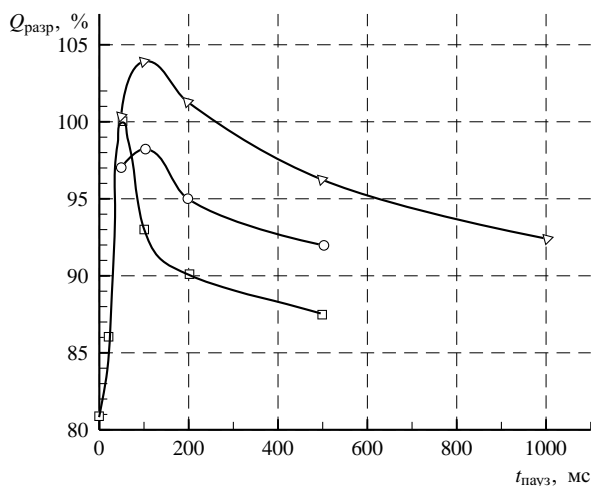


Рис. 7. Зависимость разрядной ёмкости от длительности паузы и продолжительности импульсного заряда. Параметры заряда: $I_{\text{зи}} = 0.45C_{\text{ном}}$; $t_{\text{зи}} = 200$ мс, $t = 20$ мин (○); $I_{\text{зи}} = 0.45C_{\text{ном}}$; $t_{\text{зи}} = 200$ мс, $t = 30$ мин (△); $I_{\text{зи}} = 0.80C_{\text{ном}}$; $t_{\text{зи}} = 200$ мс, $t = 10$ мин (□)

На рис. 8 представлена зависимость изменения температуры макета в процессе импульсного заряда от длительности паузы. Видно, что по мере увеличения продолжительности паузы разогрев аккумуляторов снижается, что должно приводить к повышению эффективности заряда.

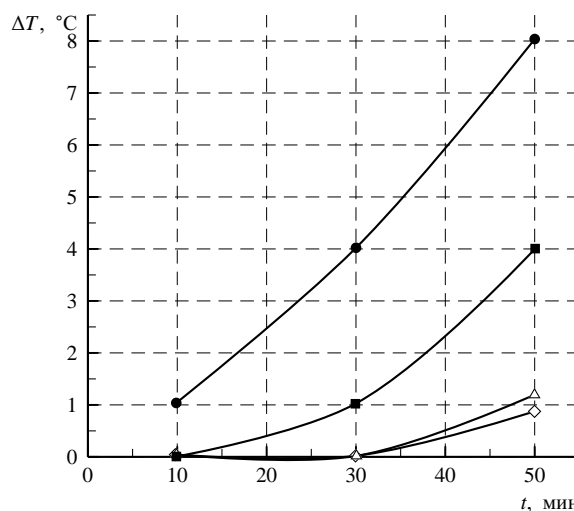


Рис. 8. Зависимость роста температуры макетов от длительности паузы и продолжительности импульсного заряда. Параметры заряда: $I_{\text{зи}} = 0.45C_{\text{ном}}$; $t_{\text{зи}} = 200$ мс. Длительность паузы: 0 (●), 100 (□), 500 (△) и 2000 мс (◇)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован процесс заряда частично заряженных (80%) свинцовых аккумуляторов импульсным током, представляющим собой чередование зарядных импульсов и пауз.

Изучено влияние на эффективность заряда и разогрев аккумуляторов основных параметров импульсного заряда, таких как амплитуда и длительность зарядного импульса, длительность паузы, общая продолжительность импульсного заряда.

В следующей статье будет рассмотрен импульсный заряд асимметричным током.

Продолжение следует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. James M., Grummet J., Rowan M. // J. Power Sources. 2006. Vol. 162. P. 878–883.
2. Lam L. T., Orgum H., Lim O. V. // J. Power Sources. 1995. Vol. 53. P. 215–228.
3. Kim S., Hong W. // J. Power Sources. 2000. Vol. 89. P. 93–101.
4. Rand D. Valve-Regulated Lead-Acid Batteries. Amsterdam; Boston; London: Elsevier, 2004.
5. Каменев Ю. Б., Штомпель Г. А., Чуиц Н. И. // Электрохим. энергетика. 2012. Т. 12, № 2. С. 64–71.
6. Vechy S. L. // Absolute Technology, professional papers / GNB Industrial Battery Company, GB-3819, REV 9/98. P. 41–49.