

УДК 621.9.06

Решетняк С. Р., Донченко Е. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДКИ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

Несмотря на бурное развитие современных технологий в области хранения электрической энергии, появление более емких аккумуляторов на основе литий-полимерных и литий-железо-фосфатных элементах, традиционные кислотные аккумуляторы по-прежнему занимают значительный сегмент рынка. Это обусловлено в первую очередь отличным соотношением величины запасаемой энергии к стоимости ее хранения. В тех случаях использования, когда вес аккумулятора не является критичным, свинцово-кислотный аккумулятор по праву сохраняет позиции на рынке устройств хранения энергии [1].

Существенным недостатком свинцово-кислотных аккумуляторов является ограниченное, по сравнению с конкурентами, число циклов заряд-разряд. Не в последнюю очередь это ограничение обусловлено отсутствием четкой и научно-обусловленной методики заряда свинцово-кислотных аккумуляторов. Действительно, несмотря на более чем столетний период эксплуатации, до сих пор свинцово-кислотные аккумуляторы заряжаются в два этапа: заряд постоянным током на первом этапе и заряд постоянным напряжением на завершающем этапе [2]. Большинство зарядных устройств, представленных на рынке, работают именно по этому принципу, мало того, современные учебники также рекомендуют именно этот принцип заряда [1].

В то же время, ряд исследователей, например [3, 4, 5], указывают на лучшие результаты заряда импульсным напряжением с изменяемой длительностью импульса. Авторы исследований утверждают, что таким образом достигается восстановление емкости аккумуляторов, сниженной в результате систематического недозаряда, что характерно, например, для накопителей солнечных электростанций.

Еще одним плюсом импульсного режима, по мнению [5], является существенное повышение эффективности и скорости заряда. Исследователи применили импульсный треугольный ток, при этом предложили три режима: активного заряда, активного разряда и режим бездействия.

В исследованиях [6] автору удалось восстановить емкость, пусковой ток и внутреннее сопротивление «сульфатированных» свинцовых аккумуляторов, не эксплуатировавшихся более 6 месяцев, благодаря применению высокочастотного импульсного генератора.

Отмечая положительные качества «импульсных» методов заряда, исследователи, тем не менее, до сих пор не привели законченное теоретическое обоснование наблюдаемых эффектов. Опираясь на математическую модель кислотного аккумулятора [7], можно предположить, что оптимальные параметры импульсов зарядки определяются мгновенным количеством доступного электролита и объемными характеристиками (площадью пор) зоны намазки пластины. Упрощенно говоря, требуемая сила тока импульса заряда определяется совокупной площадью всех пор намазки аккумулятора, а требуемая длительность импульса – количеством доступного для реакции электролита.

Кроме того, следует отказаться от рекомендуемого [1, 2] принципа завершения заряда в функции напряжения. Действительно, давно известны [1] зависимости конечного зарядного напряжения свинцово-кислотных аккумуляторов при различных режимах и температурах. Очевидно, что конечное напряжение заряда на элементе аккумулятора изменяется в широких пределах при изменении температуры, что приводит к неработоспособности принципа заряда в функции напряжения для большинства реальных применений. Таким образом, для создания современного зарядного устройства предлагается принцип импульсного заряда в функции тока.

Целью работы является исследование и разработка автоматизированного зарядного устройства, работающего на принципе контроля импульса тока, и требует, таким образом, решения двух основных вопросов:

- 1) разработка методики определения величины импульсного тока;
- 2) разработка методики определения требуемой длительности импульса заряда.

Решение задач выполнено путем практического исследования на примере герметичного свинцово-кислотного аккумулятора DELTA DT 6015, напряжением 6 В и паспортной емкостью 1500 мАч.

В рамках исследовательской работы была предложена и реализована опытная установка, структурная схема которой показана на рис. 1. Микроконтроллер STM32F030F4P6 при помощи управляемого источника тока формирует импульсы зарядного тока изменяемой величины и длительности. Датчики тока и напряжения контролируют фактические значения напряжения и тока зарядных импульсов. Аналоговые выходные сигналы датчиков преобразуются в цифровую форму при помощи встроенного в микроконтроллер 12-разрядного АЦП. Оцифрованные значения используются для решения задачи контроля, а также сохраняются на персональной ЭВМ для последующей обработки.

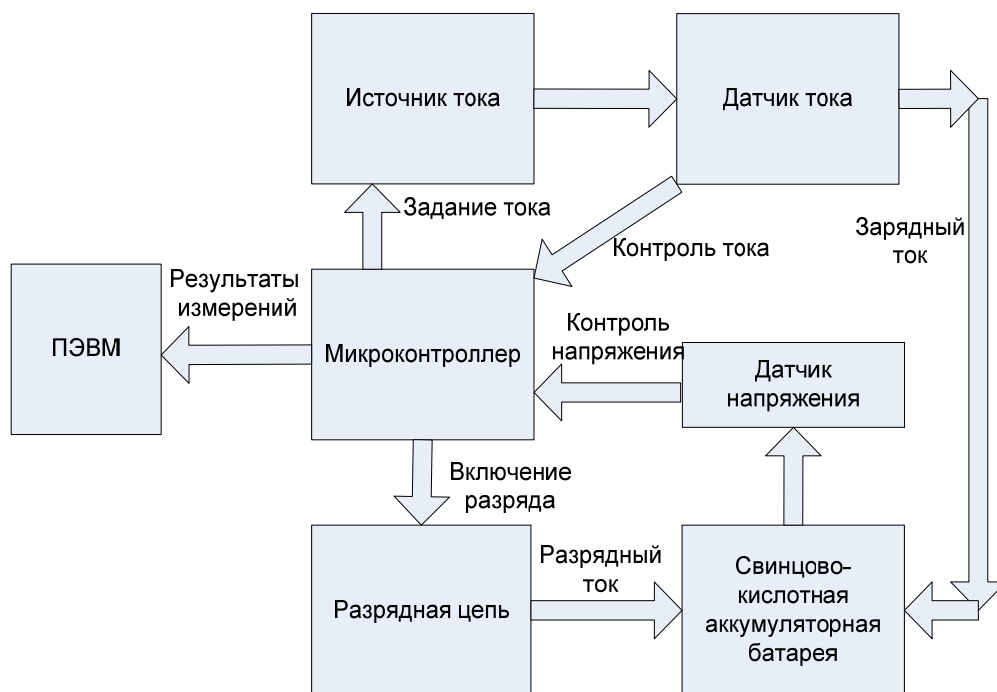


Рис. 1. Структура исследовательского стенда

Важным узлом стенда является разрядная цепь, позволяющая автоматически обеспечивать разряд аккумулятора между сериями экспериментальных измерений. Кратковременное включение разрядной цепи применяется для принудительной (разрядной) деионизации аккумуляторной батареи перед измерением установившегося напряжения. Кроме того, наличие разрядной цепи позволяет стенду выполнять автоматическое определение истинной емкости аккумулятора.

Так исследования показали, что заявленная производителем емкость не соответствует реальной. При использовании нагрузочного сопротивления 50 Ом средний разрядный ток составляет 120 мА, при времени полного разряда 6,5 ч емкость соответствует 780 мАч, что доказывает разрядная характеристика, приведенная на рис. 2. Следовательно, реальная емкость примерно в два раза ниже паспортной, что, к сожалению, довольно частое явление для низкоценового сегмента рынка аккумуляторных батарей.

Автоматически измеряемая разрядная характеристика аккумуляторной батареи используется для определения предполагаемого состояния батареи в процессе экспериментальных исследований, а также для определения максимально допустимого тока заряда в режиме работы стенда «зарядное устройство».

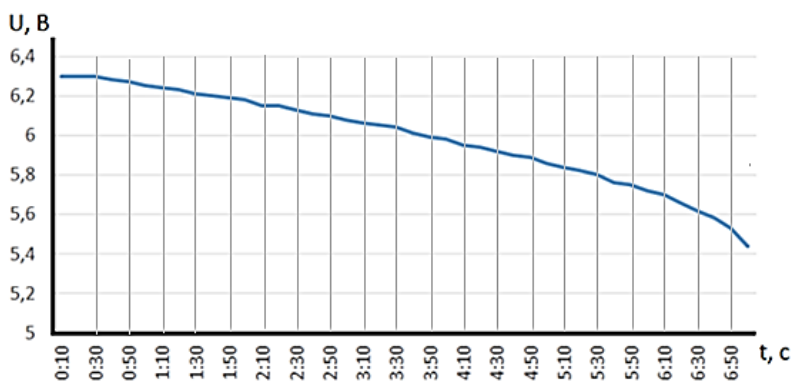


Рис. 2. Разрядная характеристика аккумуляторной батареи DELTA DT 6015

Для определения требуемой величины зарядного тока была проведена серия опытов, которые заключались в формировании зарядного импульса длительностью 5 секунд. Большинство справочных изданий, посвященных вопросу заряда свинцово-кислотных аккумуляторов, рекомендуют ток заряда $0,1C$, т. е. для выбранного аккумулятора DELTA DT 6015 этот ток не должен превышать 78 мА. Тем не менее, было высказано предположение, что при малой длительности импульса заряда можно допустить многократное увеличение тока. Были проведены опыты, в которых амплитуда импульсов тока принимала значение в диапазоне от $0,2C$ до $1C$, т. е. от 150 мА до 750 мА. На рис. 3 показаны графики напряжения на аккумуляторе в течение зарядного импульса при различных значениях тока заряда.

Анализ полученных графиков изменения напряжения на аккумуляторе в течение зарядного импульса позволяет сделать заключение о требуемом значении длины импульса заряда для выбранного значения тока заряда. Участок графика, на котором отмечается рост первой производной от напряжения, соответствует периоду времени, когда предположительно осуществляется наиболее полное электрохимическое взаимодействие. На рис. 4 показан пример численного дифференцирования графиков напряжения импульсов заряда. Максимумы функций на графике рис. 4 отмечены точками на рис. 3.

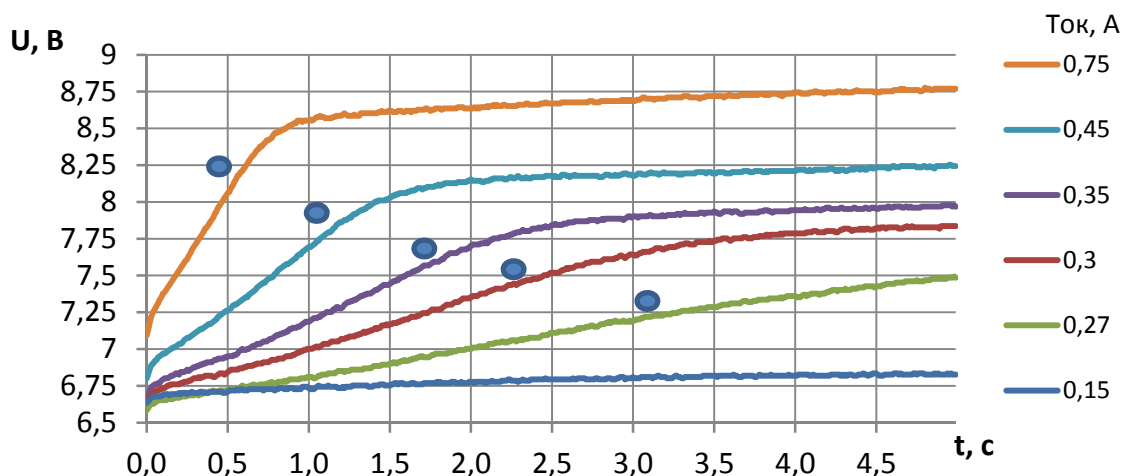


Рис. 3. Графики напряжений импульсов заряда при разных значениях тока заряда

По мере увеличения локальной концентрации кислоты на поверхности пор намазки скорость реакции уменьшается. Экспериментально установлено, что при длительности импульса заряда свыше точек максимума функций на графике 4, электролит аккумулятора начинает «кипеть». Более того, горизонтальный участок импульса (на рис. 3) соответствует зоне сильного газовыделения, когда подводимый ток расходуется в основном на процесс электролиза воды. Поэтому достижение точки максимума функций на графике 4 приняты в качестве условия прекращения зарядного импульса.

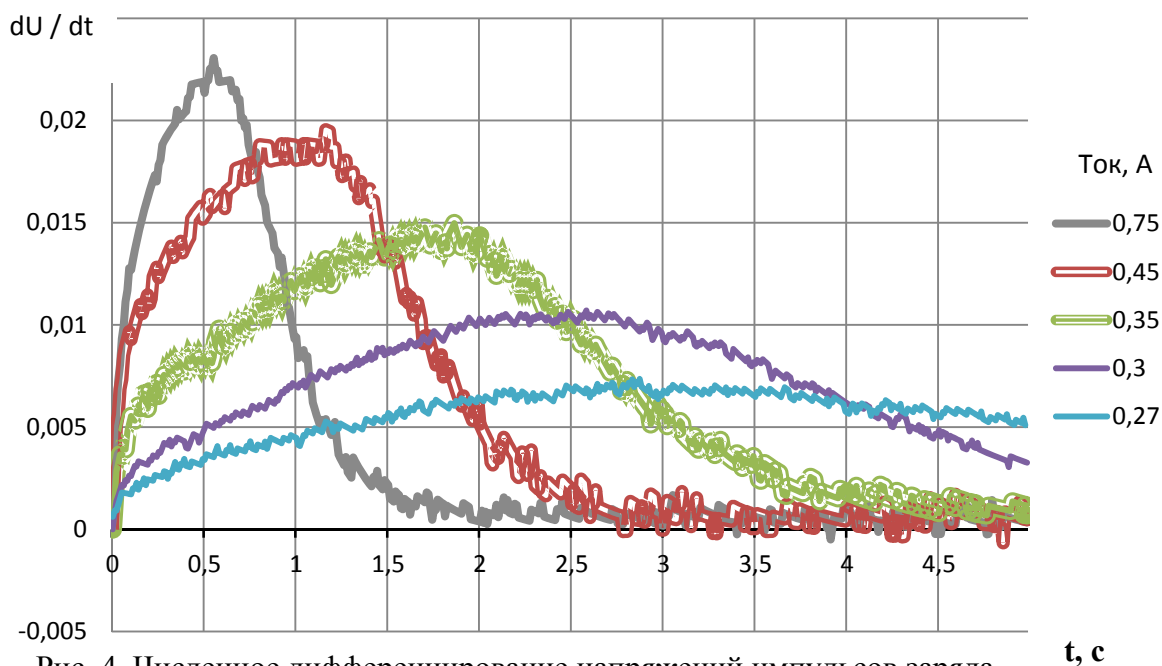


Рис. 4. Численное дифференцирование напряжений импульсов заряда

Упрощенный программный код функции формирования импульса показан на рис. 5. Сама функция запускается из прерывания SysTick, настроенного на стандартную частоту 1000 Гц. Для запуска процедуры формирования импульса заряда достаточно обнулить переменную uNumFazeImpulse.

```
void Create_Impuls(void) // Функция формирования импульса
{ switch (uNumFazeImpulse) { // Фаза импульса
  case 0: Start_Current_Impulse(); // Включить подачу зарядного тока
        uNumFazeImpulse = 1; break; // Перейти в фазу 1
  case 1: uDif_Calc = CalculeDifFilter(); // Определение текущего значения производной
        if (uDifMax < uDif_Calc) uDifMax = uDif_Calc; // Это ожидаемый максимум
        if (uDifMax > (uDif_Calc + uErrDif_Calc)) // Это спадающая ветвь
            uNumFazeImpulse = 2; // Переходим в фазу отключения тока
        break;
  case 2: Stop_Current_Impulse(); // Отключить подачу зарядного тока
        } // Конец автомата формирования импульса
} // Конец функции формирования импульса
```

Рис. 5. Программный код функции формирования импульса заряда

Таким образом, формирование требуемых длительностей импульсов заряда выполняется автоматически, как только программа фиксирует спад производной от напряжения на аккумуляторе. Предупреждение: с целью упрощения, на рис. 5 не показан код защиты от сбоев.

Для реального тестирования аккумулятора исследовательский стенд, в режиме зарядного устройства, формирует серию одиночных импульсов (длительность паузы десятикратно превышает длительность импульса) с различными значениями тока. Используя предложенный выше алгоритм, определяется не только желаемая длительность импульса, но и напряжение, приложенное к аккумулятору в момент отключения импульса. Составляется так называемая «импульсная зарядная таблица» аккумулятора, состоящая из пар значений напряжения и тока заряда $\{U_z I_z\}$.

Программная обработка «импульсной зарядной таблицы» позволяет найти ответ на вопрос о величине желаемого импульсного тока заряда. Очевидно, что для оптимизации процесса зарядки предпочтителен будет такой импульсный ток, который обеспечит максимальную полноту электрохимического взаимодействия в порах намазки, но не вызовет «кипения» электролита. Было предложено использовать синтетический критерий – величину так называемого «зарядного сопротивления» R_z , определяемого по соотношению полученных в «импульсной зарядной таблице» параметров:

$$R_z = U_z / I_z. \quad (1)$$

График зависимости «зарядного сопротивления» от тока заряда изображен на рис. 6. Было высказано предположение, что «падающий» участок графика соответствует недостаточной полноте электрохимического взаимодействия, что в принципе очевидно, так как относится к малым токам. Тогда, следует предположить, что при повышении импульсного тока до 0,5С (0,35А) и выше происходит электрохимическое насыщение (чрезмерный ток). В свою очередь, график зависимости «зарядного сопротивления» от тока заряда прекрасно коррелируется с этими соображениями.

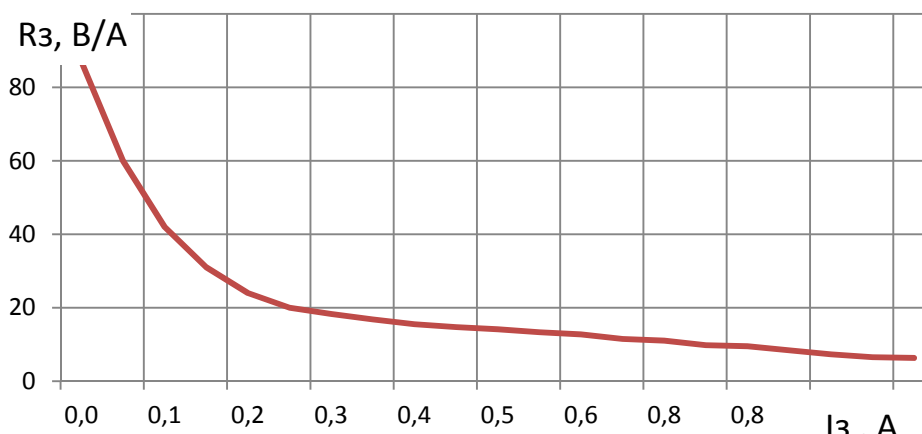


Рис. 6. Зависимости величины зарядного сопротивления от тока заряда

Для практического нахождения рекомендуемого тока следует выполнить следующие пункты «алгоритма поиска оптимального тока»:

1. Определить реальную емкость аккумулятора.
2. Задать максимальный ток $I_{max} = 1C$, где C – реальная емкость аккумулятора.
3. Просчитать все «зарядные сопротивления» для токов от $1C$ до $0,1C$.
4. Найти ток, при котором «зарядное сопротивление» составит:

$$R_{zx} > k * R_{zmax},$$

где R_{zmax} – зарядное сопротивление при токе $I = I_{max}$;

$k = 2$ – эмпирически полученный коэффициент. При таком значении коэффициента газовыделение практически не происходит.

Предполагаемый ток находится на участке графика (рис. 6) 0,28–0,31 А.

Практическое использование полученных результатов

Исследовательский стенд, структура которого показана на рис. 1, может выполнять так же функцию «зарядное устройство». Но, в отличие от режима экспериментальных исследований, в режиме «зарядное устройство» необходимо ввести критерий окончания заряда. Стандартно зарядные устройства используют в качестве критерия окончания заряда фиксированный уровень напряжения [1, 2]. Однако, как уже было сказано выше, при отрицательных температурах электролита аккумулятора заряд с фиксированным уровнем напряжения приводит к систематическому недозаряду и, как следствие, сокращению срока службы.

Было предложено в качестве критерия полноты заряда использовать плавающий уровень напряжения. После подачи на аккумулятор десяти зарядных импульсов включается разрядная цепь, выполняя деионизацию аккумулятора. После этого измеряется напряжение без нагрузки, т. е. в момент времени, когда ток аккумулятора близок к нулю. Это значение сравнивается с напряжением десяти предыдущих циклов. Величину прироста напряжения dU определяем по формуле:

$$dU = U_2 - U_1,$$

где U_1 – предыдущее значение ЭДС аккумулятора;

U_2 – последнее значение ЭДС аккумулятора.

Если величина прироста напряжения оказывается меньше заданного значения dU_3 , то цикл заряда считается завершенным. При практической реализации, величина $dU_3 = 0,05V$, выбрана с учетом погрешности измерения АЦП микроконтроллера.

ВЫВОДЫ

Таким образом, был разработан исследовательский стенд для изучения алгоритмов заряда свинцово-кислотных аккумуляторов. Стенд также служит полноценным зарядным устройством, выполняющим заряд импульсами тока. Разработан алгоритм нахождения оптимального зарядного цикла для свинцово-кислотных аккумуляторов с улучшенным контролем окончания заряда. Благодаря использованию разработанного зарядного устройства удалось повысить срок эксплуатации до 5 % относительно технических характеристик аккумуляторной батареи при низких температурах до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет недопущения недозаряда, а также предотвратить явление «кипения» электролита при высоких температурах до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таганова А. А. Герметичные химические источники тока : Элементы и аккумуляторы / А. А. Таганова, Ю. И. Бубнов, С. Б. Орлов. – СПб. : Химиздат, 2005. – 264 с.
2. Аккумуляторные батареи / Под общей редакцией П. И. Устинова. – М : Государственное энергетическое издательство, 1952. – 265 с.
3. Lam, L.T., et al, 'Pulsed-current charging of lead/acid batteries-a possible means for overcoming premature capacity loss?', CSIRO, Australia, Journal of Power Sources 53, 1995.
4. Hund, Tom, 'Battery Testing for Photovoltaic Applications,' Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, presented at 14th NREL Program Review, Nov. 1996.
5. Pei-Hsuan Cbeng, Chern-Lin Chen, 'A High-Efficiency Fast Charger For Lead-Acid Batteries', 2002.
6. Wuttibhat Jamratnaw, 'Desulfation of Lead-Acid Battery by High Frequency Pulse', 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).
7. Ziyad M. Salameh, Margaret A. Casacca , William A. Lynch, 'A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No.1, March 1992