

УДК 629.4.082.32:62-192

УСКОРЕННЫЙ ЗАРЯД ГЕРМЕТИЧНЫХ НИКЕЛЬ-КАДМИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ АСИММЕТРИЧНЫМ ТОКОМ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РЕСУРС

Г. П. Сметанкин, А. С. Бурдюгов, Т. В. Плохова

*Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт электровозостроения (ОАО «ВЭЛНИИ»), Новочеркасск, Россия*

E-mail: velnii@novoch.ru

Поступила в редакцию 22.09.2011 г.

В статье представлены результаты исследований надёжности герметичных никель-кадмиевых аккумуляторных батарей при ускоренном заряде асимметричным током. В соответствии с положениями теории надёжности обработаны экспериментальные данные испытания на наработку ресурса в режиме циклирования аккумуляторных батарей 10НКГЦ-1,8-1, 10НКГЦ-3,5-1, 10НКМГ-3, 10НКМГ-4. Подтверждено прогнозируемое увеличение ресурса, по сравнению с зарядом постоянным током, при использовании устройства автоматического заряда аккумуляторных батарей асимметричным током, уменьшение в режиме заряда нагрева и снижение интенсивности газовыделения.

Ключевые слова: асимметричный ток, ускоренный заряд, герметичный аккумулятор, ресурс, надёжность.

The research results of the sealed nickel-cadmium storage batteries reliability at the rapid charge with asymmetric current are represented. In accordance with the reliability theory postulates, the experimental data of the resource test in the mode of the storage batteries 10NKGZ-1,8-1, 10NKGZ-3,5-1, 10NKGZ-4 cycling. The predicted resource gain in comparison with the direct current charge, while using the device of automated storage batteries charge with asymmetric current is confirmed, as well as decrease in the mode of the heating-up charge, and the fall-off in gas emission intensity.

Key words: asymmetrical current, fast charge, sealed accumulator, resource, reliability.

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является изучение поведения аккумуляторных батарей (АБ), собранных из герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов (НКА), во время испытаний, включающих в себя следующие этапы:

1) циклирование (последовательное чередование циклов заряда-разряда), при котором заряд осуществляется асимметричным током в автоматизированном ускоренном режиме;

2) определение параметров наработки и количества циклов заряда-разряда в пределах изменения разрядной ёмкости аккумуляторной батареи от её начального значения у свежизготовленных батарей до значения, равного 60 % их номинальной ёмкости ($0.6C_{\text{ном}}$).

Аккумуляторная батарея за время эксплуатации изменяет свои параметры с большей или меньшей скоростью. Срок службы АБ зависит от времени хранения и количества зарядно-разрядных циклов, пока отданная ёмкость удовлетворяет требованиям технических условий для исправной батареи. Это связано с тем, что после изготовления химического источника тока в его электрохимиче-

ской системе начинают протекать необратимые процессы. К таким процессам относятся:

- коррозия корпуса и основы электрода;
- необратимые изменения активной массы (осыпание, оплывание);
- сульфатация или карбонизация электролита и др.

Эти процессы для разных систем аккумуляторов проходят с разной интенсивностью. Из источников [1–5] известно, что никель-металлгидридные и литий-ионные АБ теряют ёмкость (стареют) достаточно быстро, независимо от того, находятся они в работе или хранятся. Никель-кадмиевая электрохимическая система – наиболее устойчива к сохранности ёмкости при хранении и обладает наибольшим ресурсом. Срок хранения НКА может достигать 10 лет, а ресурс наработки располагается в пределах 1500–3000 циклов.

Согласно техническим условиям (ТУ), исправной считается АБ при условии $C \geq 0.6C_{\text{ном}}$, где C – разрядная ёмкость, отданная в процессе циклирования. Отказом АБ считается снижение отдаваемой при разряде ёмкости ниже $0.6C_{\text{ном}}$ ($C < 0.6C_{\text{ном}}$). Для герметичных никель-кадмиевых АБ, испытываемых на долговечность при цикли-

ровании режимами заряда и разряда средними (номинальными) значениями зарядных и разрядных токов, гарантируется минимальная наработка на отказ в количестве: 400 заряд-разрядных циклов с вероятностью $p = 0.99$ и 600 заряд-разрядных циклов с вероятностью $p = 0.95$ [3].

Для определения наработки на отказ используется сокращенная методика, описанная в [3]. Согласно этой методике полный цикл – заряд током, численно равным $0.1C_{ном}$, что соответствует его номинальному значению в течение 14–16 ч и разряд током, численно равным $0.2C_{ном}$, что также соответствует номинальному значению разрядного тока до напряжения 10 В на батарее, проводят после 49 частичных циклов – заряд током, численно равным $0.25C_{ном}$ в течение 3 ч 10 мин и разряд током, численно равным $0.25C_{ном}$ в течение 2 ч 20 мин, разряд на 49-м цикле проводят до напряжения 10 В на батарее. Таким образом, за 400 циклов наблюдений получают восемь значений случайной величины (разрядной ёмкости аккумуляторной батареи), а за 600 – двенадцать значений. Такого количества экспериментальных данных недостаточно для анализа результатов с помощью математического аппарата теории вероятности. Достаточный объём экспериментальных данных, необходимый для применения математического аппарата, можно получить двумя путями:

1) с использованием сокращенной методики при испытании большого количества однотипных аккумуляторов, что возможно в условиях завода-производителя при массовом производстве;

2) на ограниченном количестве АБ, проводя испытания на долговечность при циклировании в режиме полных заряд-разрядных циклов.

Нами был выбран второй путь проведения испытаний.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования поведения АБ при циклировании режимом автоматизированного ускоренного заряда были взяты герметичные АБ 10НКМГ-3 и 10НКМГ-4 – разработки НИИХИТ (г. Саратов) и герметичные АБ 10НКГЦ-1,8-1 и 10НКГЦ-3,5-1 – разработки ВНИАИ (г. Санкт-Петербург), полученные от заказчика после хранения в течение 3–5 лет.

Ускоренными называются режимы заряда, проводимые при зарядных токах, величина которых выше номинального тока заряда

($I_{ном} = 0.1C_{ном}$), что влечёт за собой соответствующее сокращение времени заряда.

Аккумуляторные батареи перед испытаниями вводились в эксплуатацию согласно инструкциям по эксплуатации [3, 5]. Контроль величин тока и напряжения осуществлялся приборами М 2044 класса 0.2. Временные интервалы в пределах 30 мин измерялись секундомером, более длительные интервалы – по часам с минутной градацией циферблата.

Исследовали поведение АБ при зарядах асимметричным током ускоренным режимом, позволяющим формировать асимметричный ток со стабилизированными амплитудами зарядных и разрядных импульсов, и обеспечивающим среднее значение зарядного тока на уровне, численно равном $0.6–0.8C_{ном}$. Заряд прекращался автоматически при достижении на АБ заданного уровня напряжения [6]. Качество заряда проверяли по отдаваемой после заряда ёмкости. Разряд проводили током, соответствующим пятичасовому режиму разряда ($I_{разр} = 0.2C_{ном}$) до напряжения 10 ± 0.2 В. В общем число циклов, сообщённых батарее во время испытаний на долговечность, включали все циклы как проведенные асимметричным током в режиме ускоренного заряда, так и циклы, проведённые на ней при всех других видах испытаний.

В процессе испытаний аккумуляторных батарей 10НКГЦ-1,8-1, 10НКГЦ-3,5-1, 10НКМГ-3, 10НКМГ-4 на наработку ресурса при циклировании в режиме автоматизированного ускоренного заряда фиксировались их разрядные ёмкости. Оценка результатов осуществлялась по известной методике [7], применяемой для получения характеристик электротехнических объектов и систем, к которым можно отнести и аккумуляторную батарею.

Аккумуляторную батарею как технический объект можно характеризовать определяющим параметром C – разрядная ёмкость, далее по тексту «ёмкость», который служит мерой качества этого объекта. Ёмкость АБ, изменяясь в процессе работы или хранения, может достигнуть критического значения, после которого состояние АБ считается неудовлетворительным (происходит отказ АБ) [7].

Изменение значений разрядной ёмкости АБ в зависимости от времени и/или числа заряд-разрядных циклов можно разбить на три периода (рис. 1).

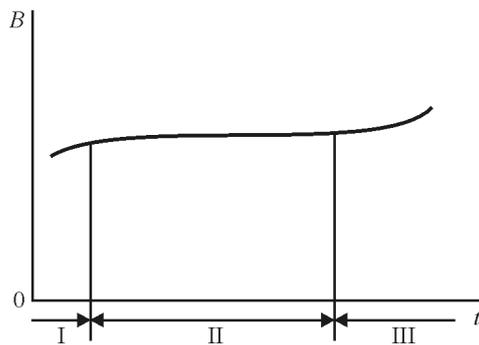


Рис. 1. Типичная реализация скорости процесса изменения ёмкости АБ от времени (или числа зарядно-разрядных циклов)

Период I – формирование АБ. Под действием внешних воздействий, одним из которых является электрический ток, в АБ происходят изменения, в результате которых активная масса электродов переходит в активное состояние, и выявляются скрытые дефекты, набор ёмкости продолжается до соблюдения равенства $C_{нач} \geq C_{ном}$. Обычно в процессе формирования происходит уменьшение скорости изменения ёмкости до момента, когда она достигнет стационарного значения. К концу периода формирования скорость изменения ёмкости АБ становится практически постоянной. Иногда формирование АБ осуществляется на заводе-производителе. В этом случае АБ имеют постоянную скорость изменения ёмкости с начала эксплуатации.

Период II – основной период работы АБ. В этот период достигнутая к концу формирования скорость изменения ёмкости АБ сохраняется примерно постоянной – линейный закон изменения ёмкости в процессе наработки. Данный период работы определяется производителем аккумуляторов в диапазоне значений отдаваемой ёмкости от $C_{нач} \geq C_{ном}$ до $0.6C_{ном}$ при номинальных токах заряда (номинальный ток заряда для каждого типа аккумуляторов определяется производителем).

Период III – «старость» АБ. В этот период ёмкость аккумуляторов определяют изменения физико-химических свойств активной массы и структуры электродов, накопленные в процессе эксплуатации, изношенное состояние токоотводов и сепарации. После прохождения аккумулятором нижней границы рабочей области скорость изменения ёмкости АБ катастрофически растет.

Критическое значение определяющего параметра будем называть границей рабочей области (поля допуска) или просто границей.

Оценить надежность АБ по экспериментальным данным можно, представив процесс развития

отказов в виде модели. Для АБ в процессе испытания на долговечность в режиме циклирования подходит модель типа «параметр – поле допуска». В этом случае АБ считается работоспособной, пока изменяющаяся в процессе эксплуатации величина ёмкости не достигнет границы установленной рабочей области.

В каждой из множества одинаковых АБ процессы изменения свойств протекают различно. Для АБ, выбранной наугад, процесс изменения ее ёмкости C можно рассматривать как случайную функцию времени или наработки. Точки пересечения реализаций случайного процесса с границей области соответствуют наработке АБ до отказа. При фиксированной наработке значение ёмкости является случайной величиной.

Рассмотрим основные особенности случайных процессов изменения ёмкости АБ.

А. Кратковременные, обратимые изменения ёмкости C происходят из-за колебаний слабоконтролируемых внешних условий. Эти изменения могут приводить к перемежающимся (то появляющимся, то исчезающим) отказам. Возможность возникновения обратимых изменений ёмкости АБ стараются предусмотреть при конструировании и устранить, чтобы это не было связано с условиями эксплуатации. Поэтому отказы из-за таких изменений возникают сравнительно редко. Исходя из сказанного можем предположить, что исследуемая величина C есть ошибка измерения, возникающая в результате суммирования воздействий множества независимых элементарных «ошибок»; тогда из теоретических соображений можно считать, что величина C подчиняется нормальному закону с плотностью

$$f(c) = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c-m_c)^2}{2\sigma_c^2}}, \quad (1)$$

и задача выравнивания статистического ряда переходит в задачу рационального выбора параметров m и σ в выражении (1).

Б. Долговременные, необратимые изменения ёмкости происходят в результате нарушений, проходящих в активной массе АБ, ее осыпания, карбонизации, разрушения основы, старения сепарации и других. На процесс изменения ёмкости оказывают большое влияние физико-химическая структура электродов и сепарации, технология изготовления и условия эксплуатации АБ. Эти случайные нарушения (назовем их процессами изна-

шивания), накапливаясь в процессе эксплуатации (с течением времени и/или числа проведенных зарядно-разрядных циклов), являются основной причиной отказов многих АБ.

Для случайных процессов изнашивания типичны весьма жёсткие связи между значениями ёмкости АБ от времени и/или числа зарядно-разрядных циклов. Реализация этих процессов в диапазоне значений отдаваемой ёмкости от $C_{нач} \geq C_{ном}$ до $0.6C_{ном}$ в наибольшей степени соответствует линейному закону.

В настоящее время в распоряжении инженера обычно имеется небольшая информация о случайных процессах изменения ёмкости АБ. За весь период эксплуатации ёмкость аккумуляторов может быть измерена лишь в редкие моменты времени. Это положение сохранится, по-видимому, и в обозримом будущем. Даже при наличии встроенных систем автоматического контроля вряд ли удастся получить более полную картину изменения ёмкости АБ в процессе эксплуатации. Это связано с постоянным контролем зарядно-разрядных циклов, что организационно достаточно тяжело обеспечить в период эксплуатации. Поэтому очень важно заранее, исходя из экспериментальных данных и накопленного опыта, определить вид реализации процесса изменения определяющего параметра АБ. Иными словами, если учесть ограниченные возможности получения экспериментальных данных об изменении ёмкости АБ, становится еще более очевидной необходимость использования линейного закона изменения ёмкости в процессе наработки в качестве модели процесса.

Таким образом, случайный процесс изменения ёмкости АБ во многих случаях целесообразно аппроксимировать выражением

$$X = C(t) + \xi(c), \quad (2)$$

где $C(t)$ – случайный процесс необратимых изменений ёмкости АБ; $\xi(c)$ – случайный процесс обратимых изменений ёмкости АБ, не зависящий от времени или числа циклов.

Случайный процесс необратимых изменений ёмкости АБ $C(t)$ удобно рассматривать в виде формулы

$$C(t) = C_{нач} - \int_0^t b(t) dt, \quad (3)$$

где $C_{нач}$ – начальное значение ёмкости АБ; $b(t)$ – скорость необратимых изменений ёмкости АБ.

Начальное значение ёмкости АБ является случайной величиной, которая зависит от тех же

кратковременных, обратимых изменений ёмкости, которые происходят из-за колебаний слабоконтролируемых внешних условий, что и случайная величина C . По физическому смыслу случайная величина C , представляющая собой погрешность величины ёмкости, является центрированной нормально распределённой величиной. Примем, что случайная величина $C_{нач}$ имеет то же распределение, что и случайная величина C , но смещена на величину начального значения ёмкости аккумулятора $C_{ном}$, следовательно,

$$C_{нач} = C_{ном} + \xi(c). \quad (4)$$

Интеграл

$$\vartheta(t) = \int_0^t b(t) dt \quad (5)$$

характеризует накопление необратимых изменений в результате старения.

Поскольку рассматриваемый нами интервал работы АБ характеризуется постоянным значением скорости изменения ёмкости АБ (см. рис. 1), функция $b(t)$ под знаком интеграла, определяющая скорость необратимых изменений ёмкости АБ, не изменяется в интервале рабочего диапазона ёмкости от $C_{нач} \geq C_{ном}$ до $0.6C_{ном}$ и времени, поэтому её можно вынести из-под знака интеграла.

Следовательно,

$$\vartheta(t) = b \int_0^t dt = b \cdot t \Big|_{t=0}^t = b \cdot t - b \cdot 0 = b \cdot t. \quad (6)$$

В соответствии с (3), (4), (6) и принятыми допущениями формула (2) приобретает вид

$$X = C_{ном} + \xi(c) - b \cdot t. \quad (7)$$

На основании полученных экспериментальных данных можно заключить, что в основной период работы скорость изменения ёмкости примерно постоянна. В силу ограниченного числа измерений текущей ёмкости АБ за весь период эксплуатации часто оказывается неизвестным действительный случайный процесс изменений их ёмкости. Таким образом, обычно в ходе исследования приходится интерполировать и экстраполировать значения ёмкости аккумуляторной батареи. Для этого необходимо иметь гипотезу о характере изменения ёмкости в процессе испытаний АБ на

наработку ресурса в режиме циклирования. В соответствии с рассуждениями, изложенными выше, естественно предположить, что процесс изменения ёмкости АБ описывается прямой линией, каждая реализация этого процесса заменяется секущей прямой, т.е. рассматриваются лишь монотонные изменения случайных значений отдаваемой ёмкости АБ в процессе наработки. Эти процессы близки к процессам, проходящим в действительности. Они очень просто описывают основные особенности процессов изменения ёмкости АБ, требуют минимального количества экспериментальных данных для вычисления характеристик случайного процесса и дают возможность наиболее просто исследовать надёжность АБ при изменении их свойств.

Поэтому линейную функцию от аргумента, подчинённого нормальному закону, можно также рассматривать как случайную величину, центр рассеяния которой с изменением аргумента смещается по линейному закону.

При рассмотрении вопроса о пересечении границы допуска случайной величиной изменения ёмкости АБ могут вычисляться показатели двух типов:

1) вероятность G_i нахождения АБ в работоспособном состоянии в фиксированный момент времени или числа зарядно-разрядных циклов t_i ; при этом рассматривается значение ёмкости АБ как случайной величины в момент t_i ;

2) показатели времени или числа зарядно-разрядных циклов до появления параметрического отказа – пересечения ёмкостью АБ границы допуска; при этом для оценки параметрической надёжности могут использоваться показатели: количества зарядно-разрядных циклов до отказа $\varphi(c)$; функция надёжности $p(t)$; интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Для определённости примем, что АБ считается работоспособной, если её ёмкость C больше границы допуска ω ($C \geq 0.6C_{\text{ном}}$). Тогда для фиксированного момента времени или числа зарядно-разрядных циклов t_i вероятность того, что АБ работоспособна, равна

$$G_{\omega} = \int_{\omega}^{\infty} f_i(c) dc, \quad (8)$$

где $f_i(c)$ – величина C значения ёмкости АБ, подчиняющаяся нормальному закону распределения при $t = t_i$.

Выше уже говорилось, что обычно ёмкость АБ как случайная величина, имеет нормальное распределение:

$$f_i(c) = \frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma_{C_i}} \exp\left[-\frac{(c - m_{C_i})^2}{2\sigma_{C_i}^2}\right], \quad (9)$$

где m_{C_i} , σ_{C_i} – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение значений ёмкости АБ в момент конкретного заряд-разрядного цикла (времени) t_i .

Нормирующий множитель k находится из условия [7]:

$$k \int_{c_1}^{c_2} f_i(c) dc = 1, \quad (10)$$

где (c_1, c_2) – диапазон возможных значений ёмкости АБ. При нормальном законе распределения $f(c)$, используя нормированную функцию Лапласа $\Phi(u)$, получим:

$$k = \frac{1}{\Phi(u_2) - \Phi(u_1)}, \quad (11)$$

где $u_1 = \frac{c_1 - m_{C_i}}{\sigma_{C_i}}$; $u_2 = \frac{c_2 - m_{C_i}}{\sigma_{C_i}}$.

При нормальном распределении значений ёмкости АБ из (8) имеем:

$$G_{\omega} = \int_{\omega}^{\infty} \frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma_{C_i}} \exp\left[-\frac{(c - m_{C_i})^2}{2\sigma_{C_i}^2}\right] dc \quad (12)$$

или

$$G_{\omega} = k \left[\frac{1}{2} - \Phi(u_i) \right], \quad (13)$$

где $u_i = \frac{\omega - m_{C_i}}{\sigma_{C_i}}$.

Обычная ошибка в использовании значения G_{ω} состоит в том, что ее смешивают с вероятностью $p(t_2 - t_1)$ безотказной работы в течение интервала $(t_2 - t_1)$. Величина $G_{\omega i}$ характеризует долю АБ, работоспособных в момент конкретного зарядно-разрядного цикла (времени) t_i , тогда как вероятность безотказной работы $p(t_2 - t_1)$ характеризует способность АБ к безотказной работе в течение заданного интервала заряд-разрядных циклов (интервала времени) $(t_2 - t_1)$.

При случайном процессе изменения ёмкости АБ, имеющем монотонные реализации, плотность распределения зарядно-разрядных циклов (времени) до отказа запишем в виде

$$f(t_i) = -\frac{dG(\omega, t)}{dt} \Big|_{t=t_i} = \frac{dS(\omega, t)}{dt} \Big|_{t=t_i}, \quad (14)$$

где $S = 1 - G$ – вероятность того, что АБ находится в неработоспособном состоянии.

Связь распределений $f(C)$ и $f(t)$ иллюстрирует рис. 2, где изображена нормально распределенная равномерная случайная функция $C(t)$. Вероятности $S(\omega) = 1 - G(\omega)$ того, что АБ при циклировании находится в неработоспособном состоянии при границе, равной ω , соответствует заштрихованная площадь под кривой распределения $f_i(C)$. Приращение этой площади за период времени (циклирования) $(t_{i+1} - t_i)$ пропорционально вероятности отказа АБ за этот период.

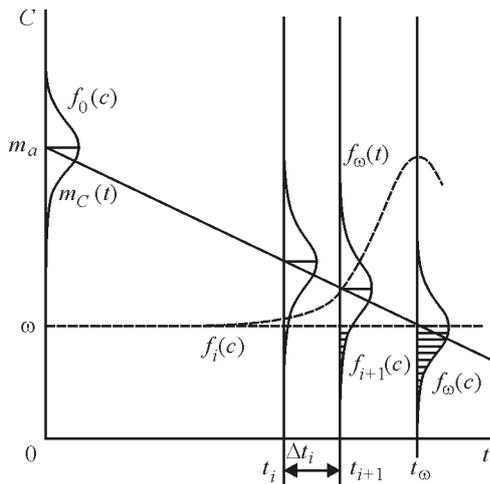


Рис. 2. Получение нормального распределения наработки до отказа при равномерной случайной функции $C(t)$

Вычисление плотности вероятности зарядно-разрядных циклов до отказа АБ проводим следующим образом. Для каждого интервала циклирования (времени) $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ находим среднее на этом интервале значение плотности распределения зарядно-разрядных циклов до отказа, делим приращение вероятности того, что АБ находится в неработоспособном состоянии, на длину интервала:

$$[f_i]_{cp} = \frac{G_{\omega i} - G_{\omega(i+1)}}{t_{i+1} - t_i} = \frac{S_{\omega(i+1)} - S_{\omega i}}{t_{i+1} - t_i}. \quad (15)$$

При нормальном распределении ординату случайного процесса формулу (6) в соответствии с формулами (4), (5) можно выразить через нормированную функцию Лапласа [8]:

$$[f_i]_{cp} = \frac{k[\Phi(u_{i+1}) - \Phi(u_i)]}{t_{i+1} - t_i}. \quad (16)$$

По полученным значениям строится гистограмма, которая сглаживается непрерывной кривой.

Таким образом, для вычисления среднего значения $[f_i]_{cp}$, соответствующего интервалу Δt_i , необходимо знать законы распределения ёмкости АБ в начале и конце этого интервала. Для нормально распределённой случайной функции $C(t)$ достаточно знать лишь ее характеристики $m_C(t)$ и $\sigma_C(t)$, по которым находят значения m_C и σ_C , соответствующие началу и концу каждого из интервалов Δt_i [8, 9].

В соответствии с положениями, изложенными выше, были обработаны экспериментальные данные испытания на долговечность в режиме циклирования аккумуляторных батарей 10НКГЦ-1,8-1, 10НКГЦ-3,5-1, 10НКМГ-3, 10НКМГ-4. В обработку были включены только результаты, полученные при заряде аккумуляторных батарей асимметричным током на установке автоматического ускоренного заряда.

Обработка проводилась по следующей схеме:

1) для массива случайных чисел (отдаваемая аккумулятором ёмкость) в качестве функции, описывающей характер изменения ёмкости в процессе испытания, подбиралась равномерная линейная функция;

2) массив случайных чисел разбивался на интервалы и относительно выбранной линейной функции, по критерию Пирсона, проверялось соответствие распределения случайной величины нормальному закону, вычислялась вероятность того, что величина, имеющая распределение χ^2 с s степенями свободы, превзойдет данное значение χ^2 с заданной доверительной вероятностью $p = 0.1$ [9]; $s = k - 3$, где k – количество интервалов разбиения;

3) вычислялись \bar{m}^* – центрированное среднее для нормального закона распределения относительно линейной модели изменения ёмкости батареи и σ – среднеквадратичное отклонение (стандарт) нормального закона распределения [8];

4) результаты обработки экстраполировались для определения $N_{p=0.99}$ – минимального количества циклов с доверительной вероятностью $p = 0.99$ (3σ) и $N_{p=0.95}$ – минимального количества циклов наработки до отказа с доверительной вероятностью $p = 0.95$ (2σ).

На рис. 3–6 графически представлены результаты обработки экспериментальных данных для батарей, проходивших испытания. Полученные результаты объединены в таблицу.

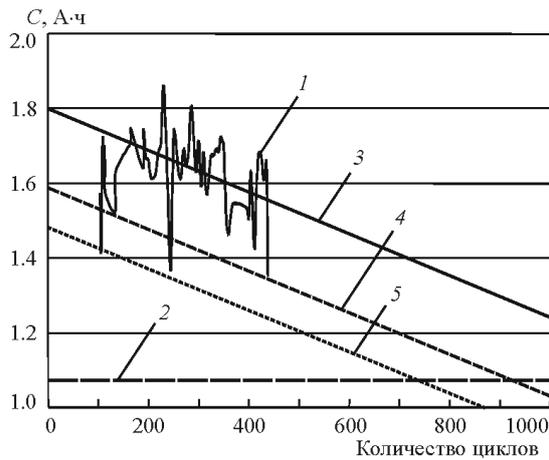


Рис. 3. Определение параметров наработки батареи 10НКГЦ-1,8-1 при автоматизированном ускоренном заряде: 1 – отдаваемая ёмкость, 2 – граница поля допуска (ω), 3 – линия изменения отдаваемой ёмкости, 4 – линия поля допуска отдаваемой ёмкости при $p = 0.95$ (2σ), 5 – линия поля допуска отдаваемой ёмкости при $p = 0.99$ (3σ)

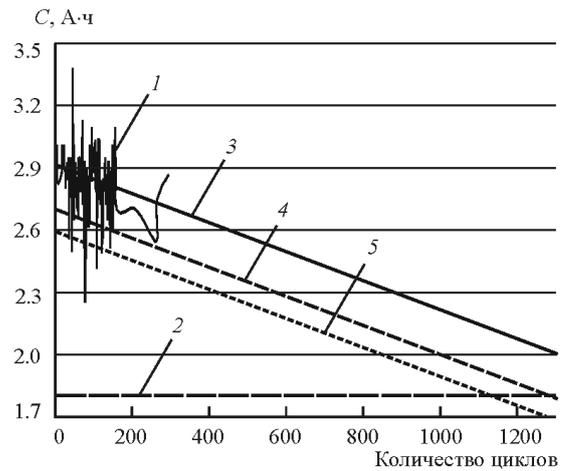


Рис. 5. Определение параметров наработки батареи 10НКМГ-3 при автоматизированном ускоренном заряде: 1 – отдаваемая ёмкость, 2 – граница поля допуска (ω), 3 – линия изменения отдаваемой ёмкости, 4 – линия поля допуска отдаваемой ёмкости при $p = 0.95$ (2σ), 5 – линия поля допуска отдаваемой ёмкости при $p = 0.99$ (3σ)

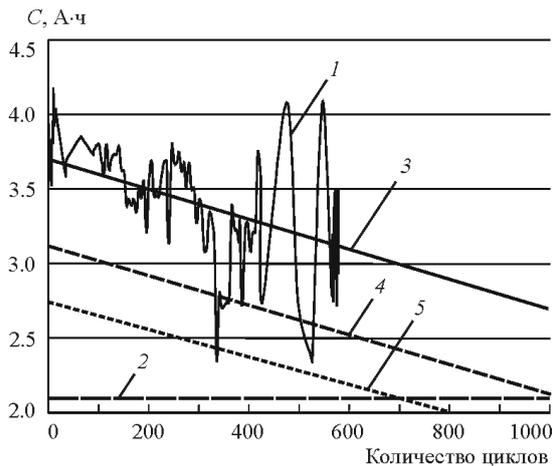


Рис. 4. Определение параметров наработки батареи 10НКГЦ-3,5-1 при автоматизированном ускоренном заряде: 1 – отдаваемая ёмкость, 2 – граница поля допуска (ω), 3 – линия изменения отдаваемой ёмкости, 4 – линия поля допуска отдаваемой ёмкости при $p = 0.95$ (2σ), 5 – линия поля допуска отдаваемой ёмкости при $p = 0.99$ (3σ)

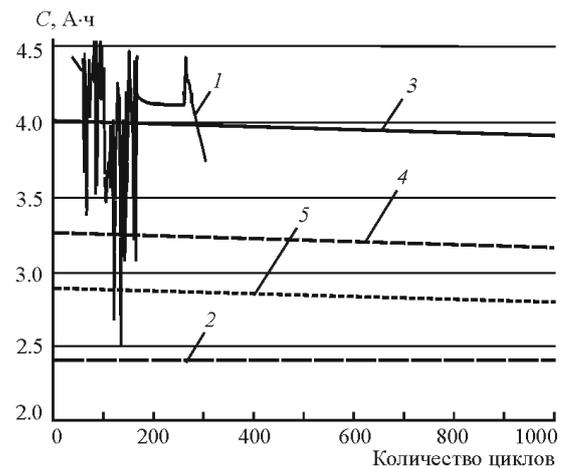


Рис. 6. Определение параметров наработки батареи 10НКМГ-4 при автоматизированном ускоренном заряде: 1 – отдаваемая ёмкость, 2 – граница поля допуска (ω), 3 – линия изменения отдаваемой ёмкости, 4 – линия поля допуска отдаваемой ёмкости при $p = 0.95$ (2σ), 5 – линия поля допуска отдаваемой ёмкости при $p = 0.99$ (3σ)

Результаты обработки экспериментальных данных

Тип батареи	ω , А·ч	$C_{нач}$, А·ч	b , А·ч	\bar{m}^* , А·ч	σ , А·ч	s	χ^2	p	$N_{p=0.99}$ (3σ)	$N_{p=0.95}$ (2σ)
10НКГЦ-1,8-1	1.08	1.9	0.0006	0.029	0.114	2	4.19	0.1	730	930
10НКГЦ-3,5-1	2.10	3.7	0.0010	0.008	0.091	5	8.07	0.1	640	980
10НКМГ-3	1.80	3.0	0.0007	0.019	0.107	5	8.30	0.1	1150	1300
10НКМГ-4	2.4	4.4	0.0003	0.018	0.372	3	6.07	0.1	2400	4200

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании анализа полученных данных можно заключить, что:

1) аккумуляторная батарея 10НКГЦ-1,8-1 проходила испытания на заряд сверхкороткими режимами постоянного тока (время заряда равно 30 мин, в результате проведения которых наблюдалась потеря ёмкости. Испытания на наработку ресурса в режиме циклирования следовали по окончании исследований поведения аккумуляторной батареи при сверхкоротких режимах заряда постоянным и асимметричным токами. До начала наработки было проведено 103 заряд-разрядных цикла, в том числе 92 сверхкороткими режимами заряда. Всего на аккумуляторной батарее было проведено 450 цикла, из которых 347 – в рамках испытаний на наработку ресурса в режиме циклирования и отдаваемая ёмкость по окончании испытаний составила 1.62 А·ч, что выше границы рабочей зоны $C_{\text{раб}} > 0.6C_{\text{ном}}$. Расчётное количество циклов минимальной наработки на отказ $N_{p=0.99} \approx 730$;

2) аккумуляторная батарея 10НКГЦ-3,5-1 проходила испытание на наработку ресурса в режиме циклирования при зарядах только режимом асимметричного тока на установке автоматического ускоренного заряда. Всего был проведён 571 цикл, и отдаваемая ёмкость по окончании испытаний составила 3.47 А·ч (в среднем за три последних эксперимента).

3) аккумуляторная батарея 10НКМГ-3 проходила испытание на наработку ресурса в режиме циклирования при зарядах только режимом асимметричного тока на установке автоматического ускоренного заряда. Всего было проведено 295 циклов и отдаваемая ёмкость по окончании испытаний составила 2.87 А·ч.

4) на батарее 10НКМГ-4 перед началом испытаний на наработку ресурса в режиме циклирования асимметричным током было проведено 30 циклов при заряде часовым режимом постоянного тока (что допускается производителем), на 28-, 29- и 30-м циклах отдаваемая ёмкость начала резко снижаться. С 31-го цикла начались испытания на долговечность, отдаваемая ёмкость возросла. Всего было проведено 310 циклов и отдаваемая ёмкость по окончании испытаний составила 3.72 А·ч.

Полученные результаты согласуются с данными источников [1, 2] и др. при наработке ресурса никель-кадмиевых аккумуляторных батарей средними (номинальными) режимами заряда постоянным током.

Необходимо отметить также, что в процессе испытаний на наработку ресурса при заряде АБ ускоренными режимами асимметричного тока не возникло необходимости проведения циклов восстановления ёмкости при заряде постоянным то-

ком номинальным режимом [10]. По техническим условиям при заряде АБ в процессе эксплуатации обязательным условием является проведение зарядно-разрядных циклов номинального режима для восстановления ёмкости.

Анализ кривых изменения напряжения на аккумуляторных батареях в процессе заряда асимметричным током показал, что при испытаниях на долговечность и выбранных режимах асимметричного тока происходит сокращение времени заряда. Для разных аккумуляторных батарей этот процесс проходит с разной интенсивностью. Для аккумуляторных батарей, которые по отдаваемой ёмкости приближались к границе рабочей зоны, наблюдалось снижение максимума напряжения на зарядной кривой, что можно объяснить накоплением различий ёмкостей аккумуляторов в батарее.

ВЫВОДЫ

Для всех аккумуляторных батарей, которые проходили испытания на наработку ресурса в режиме циклирования с использованием технологии автоматизированного ускоренного заряда, при наработке количества циклов, соответствующих минимальной наработке, указанной в ТУ, падение ёмкости составляло менее $0.1C_{\text{ном}}$. Это говорит о большом потенциальном запасе увеличения ресурса наработки. При прохождении аккумуляторными батареями почти двукратного ресурса наработки ёмкость батарей упала незначительно. На батарее, прошедшей 890 полных циклов ускоренного полуторачасового заряда, ёмкость упала до $0.8C_{\text{ном}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компания ООО «Энергия» (торговая марка Sentosa Battery) : сайт. URL : <http://www.sentosa.ru> (дата обращения 10.08.2011).
2. Компания GP Batteries International Limited : сайт. URL : <http://www.gpbatteries.com> (дата обращения 10.07.2011).
3. ТУ 44ПК-4676561-009-94. Батареи НКГЦ. Талды-Курган, 1994. 34 с.
4. ЖШИТ.563341.002ПС. Аккумулятор никель-кадмиевый НКГЦ-0,5-111С. Паспорт и инструкция по эксплуатации. Луганск, 1992. 5 с.
5. Аккумуляторы и батареи аккумуляторные щелочные никель-кадмиевые и никель-железные : Техническое описание и инструкция по эксплуатации 0.358.011 ТО. М., 1992. 32 с.
6. Пат. 2207665 РФ. Способ автоматического ускоренного заряда герметичных никель-кадмиевых аккумуляторных батарей асимметричным током.
7. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. М., 1986. 480 с.
8. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М., 1978. 319 с.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., 1962. 564 с.
10. Кукоз Ф. И., Сметанкин Г. П., Кобак В. Г., Бурдюгов А. С. // Изв. вузов. Электромеханика. 2001. Т. 4–5. С. 100–103.