

УДК 629.78.064.5

**К.В. БЕЗРУЧКО, А.О. ДАВИДОВ, С.В. СИДЕНКО, С.В. ШИРИНСКИЙ***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕМКОСТИ  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ**

Рассмотрены методы определения емкости электрохимических аккумуляторов, их достоинства и недостатки. Обоснован выбор экспериментального метода с использованием параллельной схемы подключения для определения емкости электрохимических аккумуляторов. Описан разработанный стендовый комплекс для экспериментальной отработки предложенного метода с применением параллельной схемы подключения электрохимических аккумуляторов.

**электрохимический аккумулятор, емкость, разрядные характеристики, схемы подключения****Введение**

Для проверки качества нового электрохимического аккумулятора (АК) и определения работоспособности АК в процессе его эксплуатации на всех стадиях работы с ним возникает необходимость определения его емкости.

**Постановка задачи.** В ходе эксплуатации АК одной из важнейших задач является определение фактической разрядной емкости, при заданных условиях разряда, поскольку именно эта характеристика определяет способность АК обеспечивать энергией нагрузку в течение заданного времени [1 – 3].

Разрядной емкостью называют количество электричества, которое можно получить от АК при определенных условиях его работы, т.е. при заданных значениях температуры, зарядного тока и конечного разрядного напряжения.

Разрядная емкость является комплексным параметром АК и зависит от внутреннего сопротивления АК, напряжения под нагрузкой и других параметров состояния АК.

Существуют следующие методы определения емкости:

1. Экспериментально-расчетный метод.
2. Экспериментально-графический метод.
3. Аналитический метод.
4. Экспериментальный метод.

Выбор наиболее приемлемого метода определения емкости электрохимических АК с наиболее высокой точностью является одной из приоритетных задач диагностики АК.

**Анализ предлагаемых методов**

**Экспериментально-расчетный метод** предполагает использование для определения емкости уравнения разрядной характеристики АК. Примером такой зависимости для никель-кадмиевых (НК) АК является выражение (1) [1, 3].

$$U = E_0 + \frac{\Psi_0}{Q_{\Psi H}} (Q_{\Psi H} - It) + \varphi_0 \exp\left(-\frac{3It}{Q_{\Phi}}\right) - U_{r_0} \left\{ 1 + \beta \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\alpha I C}{Q_{\Psi} - It}\right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – э.д.с. разряженного АК;  $\alpha$ ,  $\beta$  – постоянные поправочные коэффициенты, для НК АК  $\alpha = 0,26$  и  $\beta = 30$  [3];  $\Psi$  – разность между э.д.с., соответствующей точке пересечения прямолинейного участка кривой  $E = f(Q)$  с осью ординат, и э.д.с. разряженного АК;  $Q_{\Psi}$  – разрядная емкость АК при 100-часовом режиме разряда;  $Q_{\Psi H}$  – разрядная емкость АК при 100-часовом режиме разряда до конечного напряжения;  $\varphi_0$  – разность уровней напряжений на оси ординат, одно из которых соответ-

вует началу разрядной кривой, а другое – точке пересечения прямолинейного участка с осью ординат;  $Q_{\phi}$  – разрядная емкость АК, при которой начальные криволинейные участки разрядных кривых сопрягаются с прямолинейными;  $U_{r_0}$  – напряжение на клеммах АК под нагрузкой.

**Экспериментально-графический метод** основан на анализе разрядных кривых АК. Отличия данного метода от экспериментально-расчетного заключаются в его реализации, когда для описания разрядных кривых вместо уравнений используются диаграммы. Соответственно общим недостатком данных методов является необходимость проведения полного разряда АК для получения разрядных кривых. С другой стороны оба метода не требуют длительных экспериментальных исследований, обеспечивают приемлемую для оценки точность ( $\pm 5\%$ ) и позволяют оценить емкость АК при любом разрядном токе.

**Аналитический метод** позволяет определить непосредственно разрядную емкость, не прибегая к полному разряду АК, путем измерения при определенном токе  $I_c$  (или сопротивлении  $R$ ) напряжения  $U$  и э.д.с.  $E$  аккумулятора [2, 3]. Для НК АК зависимость емкости от вышеуказанных параметров можно описать выражениями (2, 3) [4]:

$$Q_{I_0} = \frac{\alpha I_C}{\ln \beta U_{r_0} - \ln(\beta U_{r_0} + U - E)}; \quad (2)$$

$$Q_{R_0} = \frac{\alpha U_H}{R[\ln \beta U_{r_0} - \ln(\beta U_{r_0} + U - E)]}, \quad (3)$$

где  $Q_{I_0}$  – разрядная емкость, рассчитанная с использованием измерений при постоянном токе,  $I_C = const$ ;  $U_{r_0} = 0,04$  В – падение напряжения на полном внутреннем сопротивлении заряженного АК при разрядном токе численно равном  $0,01Q_H$ ;  $U$  – напряжение на клеммах АК, В;  $E$  – э.д.с. аккумулятора, В;  $Q_{R_0}$  – разрядная емкость, рассчитанная с

использование измерений при постоянной нагрузке,  $R = const$ .

Данный метод не требует больших затрат времени и средств, однако не дает достаточно высокой точности. Точность расчета по данному методу тем выше, чем больше разрядный ток или меньше сопротивление. При разрядном токе, численно равном номинальной емкости, для НК АК точность составляет  $\pm 10\%$ .

**Экспериментальный метод** заключается в определении емкости АК путем проведения полного разряда АК. Разрядная емкость АК в общем случае определяется из выражения:

$$Q_p = \int_0^{t_p} I_p dt, \quad (4)$$

где  $Q_p$  – разрядная емкость, А·ч;  $I_p$  – разрядный ток, А;  $t_p$  – время разряда, ч.

Для различных режимов разряда АК применяются частные случаи выражения (4). Так разряд АК ступенчатым стабилизированным током (рис. 1) позволяет использовать для определения емкости выражение:

$$Q_p = \sum_{i=1}^{n_c} I_i \cdot \Delta t_i, \quad (5)$$

где  $I_i$  – разрядный ток  $i$ -й ступени, А;  $\Delta t_i$  – продолжительность ступени тока разряда;  $n_c$  – количество ступеней тока разряда.

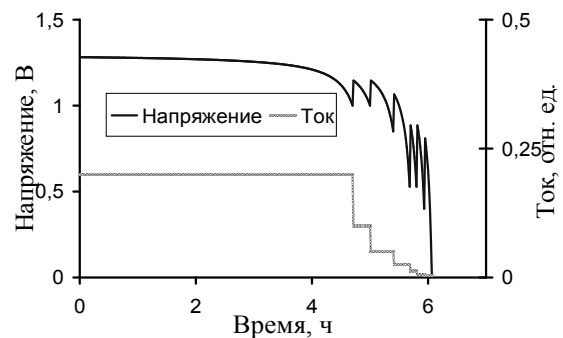


Рис. 1. Разрядная характеристика НКГ АК и зависимость тока от времени при ступенчатом разряде стабилизированным током

В наиболее распространенном случае, когда применяется только одна ступень тока разряда, выражение (5) еще более упрощается:

$$Q_p = I \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где  $I$  – разрядный ток, А;

$\Delta t$  – продолжительность разряда, ч.

Разряд постоянным стабилизированным током (рис. 2) является общепринятым способом определения емкости АК и подкреплен соответствующими стандартами [2, 3]. Преимуществами этого способа являются простота реализации и высокая точность, недостатками – относительно высокая продолжительность и необходимость практически полного разряда АК, что делает необходимым последующий заряд для приведения АК в рабочее состояние.

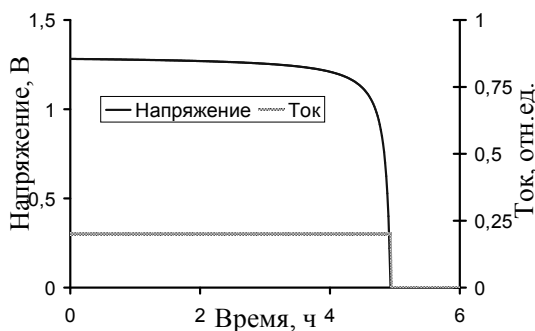


Рис. 2. Разрядная характеристика НКГ АК и зависимость тока от времени при разряде постоянным стабилизированным током

Для разряда АК на постоянное сопротивление, что является наиболее простым методом с точки зрения применяемого оборудования, выражение (4) приобретает вид:

$$Q_p = \frac{1}{R} \int_0^{t_p} U_p dt, \quad (7)$$

где  $U_p$  – разрядное напряжение, В;  $R$  – постоянное омическое сопротивление нагрузки, на которую производится разряд АК, Ом.

Ток разряда АК при разряде на постоянное сопротивление (рис. 3), уменьшается со временем, что несколько увеличивает продолжительность разряда.

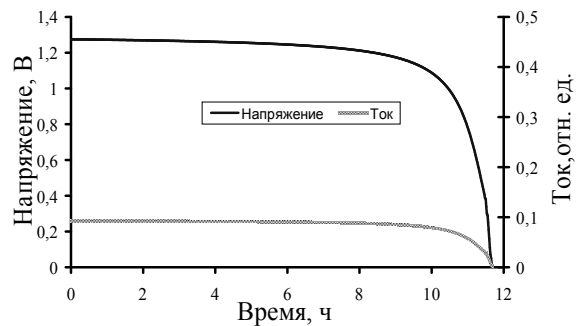


Рис. 3. Разрядная характеристика и зависимость тока от времени при разряде НКГ АК на постоянное сопротивление 0,15 Ом (квазистабильный десятичасовой ток)

В тоже время, до напряжения 1 В, которое считается граничным для определения емкости НК АК, ток разряда изменяется незначительно, что позволяет использовать разряд на постоянное сопротивление для оценки емкости. Для таких оценочных расчетов можно использовать выражение (6). Следует заметить, что выражение (7), при проведении разряда на постоянное сопротивление, позволяет получить точное значение емкости.

Режим разряда АК при постоянном напряжении реализуется крайне редко, так как требует наличия специфической зависимости сопротивления нагрузки и разрядного тока от времени в процессе разряда (рис. 4) и не имеет никаких преимуществ при эксплуатации АК.

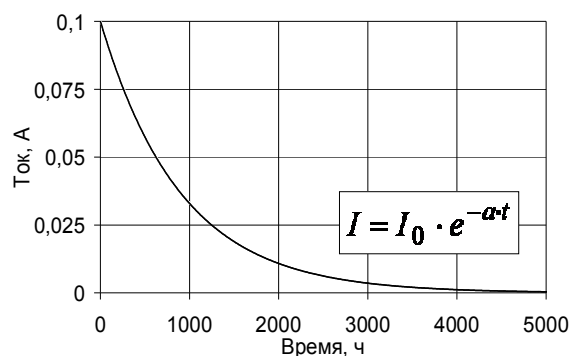


Рис. 4. Зависимость тока разряда при постоянном напряжении 1,3 В от времени разряда, полученная в результате математического моделирования НКП АК без учета влияния саморазряда

Зависимость, приведенная на рис. 4, имеет чисто иллюстративный характер, так как влияние самораз-

ряда и изменение внутреннего сопротивления АК заметно искажают картину уже в масштабе десятков часов.

Разрядную емкость АК в данном случае можно определить из выражения (8) или из общей зависимости (4):

$$Q_p = U_p \int_0^{t_p} \frac{1}{R} dt. \quad (8)$$

Основными преимуществами экспериментального метода, особенно при условии применения разряда постоянным стабилизированным током, являются высокая точность, которая ограничивается только возможностями оборудования, и простота. Метод широко применяется в технике и подкреплён нормативной документацией [2].

Определение емкости электрохимических АК сопряжено с определенными трудностями, поскольку характеристики отдельных АК могут иметь достаточно большой разброс значений.

Общепринятой считается последовательная схема подключения АК к нагрузке (рис. 5) или разрядному устройству при проведении разряда в силу простоты и отсутствия необходимости проведения демонтажа батареи.

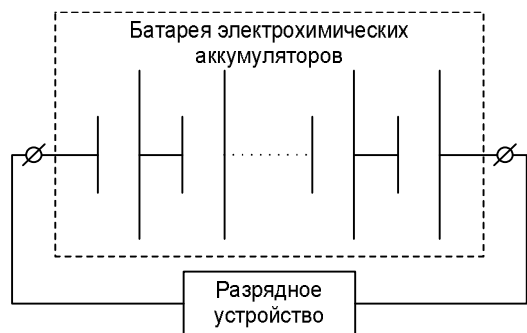


Рис. 5. Последовательная схема подключения АК к разрядному устройству

При разряде батареи для определения емкости отдельных АК представленной на рис. 6 существует возможность глубокого переразряда отдельных АК, что может отразиться на их состоянии, либо недоразряда части АК, вследствие чего для определения их емкости необходимо будет произвести аппрок-

симацию разрядных характеристик, что отразится на точности результатов.

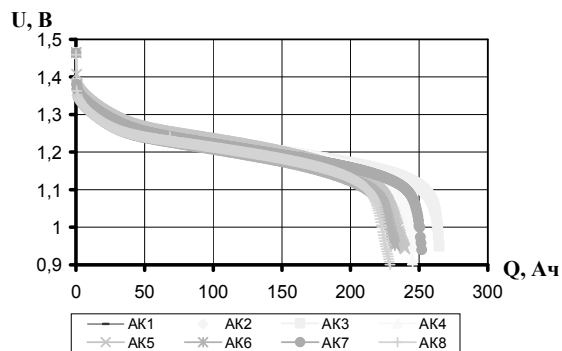


Рис. 6. Разрядные характеристики АК в составе батареи

Для исключения эффектов, связанных с разбросом характеристик АК, авторы рекомендуют применять параллельную схему подключения АК к разрядному устройству (рис. 7).

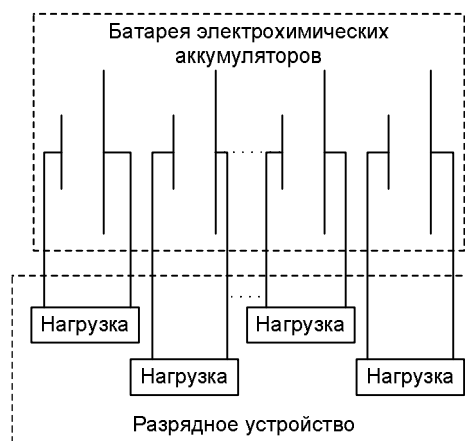


Рис. 7. Параллельная схема подключения АК к разрядному устройству

Применение параллельной схемы подключения АК позволяет определить емкость отдельных АК, поскольку взаимное влияние АК и эффекты, связанные с разбросом характеристик, в данном случае отсутствуют. Недостатками данной схемы являются необходимость проведения демонтажа батареи, возможность осуществления которого зависит от конструкции батареи, и применение значительно более сложного оборудования по сравнению с требованиями последовательной схемы.

Для экспериментальной отработки с применением последовательной схемы подключения электро-

химических АК был разработан стендовый комплекс (рис. 8), позволяющий:

1. Производить многоканальное измерение напряжений на клеммах отдельных АК (до 32 каналов одновременно).
2. Производить разряд стабилизированным током одновременно до 16 АК с использованием параллельной схемы подключения и высокой точностью установки тока.
3. Производить заряд стабилизированным током одновременно до 16 АК с использованием параллельной схемы подключения и высокой точностью установки тока.
4. Производить многоканальное измерение температуры поверхности аккумуляторов (до 32 каналов одновременно).
5. Автоматизировать процесс определения емкости АК и реализовывать различные алгоритмы диагностики с помощью системы управления испытаниями на базе ЭВМ.



Рис. 8. Автоматизированный стендовый комплекс для диагностирования и испытаний электрохимических аккумуляторов

Как было сказано выше, погрешность определения емкости экспериментальным методом (при условии, что разряд проводится стабилизированным током) определяется исключительно возможностями оборудования.

Применение параллельной схемы подключения и высокоточного зарядно-разрядного и измерительного оборудования позволяет определять емкость АК с погрешностью не более 2, 5%.

## Заключение

Результаты обработки экспериментального метода определения емкости с применением параллельной схемы подключения АК и разряда стабилизированным током показали, что, несмотря на сложность реализации, данный метод оправдывает свое применение в силу высокой точности. Таким образом, для точного определения емкости авторы считают целесообразным применять предложенный метод. Для оценки емкости в зависимости от требуемой точности и допустимой продолжительности мероприятий могут применяться различные методы. Для грубой оценки емкости предпочтительно применение аналитического метода, так как он не требует продолжительных мероприятий и сложного оборудования. Более точную оценку целесообразно проводить экспериментальным методом с применением разряда на постоянное сопротивление.

Экспериментально-расчетный и экспериментально-графический методы удобно применять в случаях, когда необходимо оценить разрядную емкость АК при разряде различными токами.

## Литература

1. Методы диагностирования аккумуляторов / К.В. Безручко, А.С. Василенко, А.О. Давидов, А.А. Харченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: ХАИ, 2002. – Вип. 31. – С. 221-224.
2. ГОСТ Р МЭК 60623-2002 – Аккумуляторы и батареи щелочные. Аккумуляторы никель-кадмиевые открытые призматические. Введен 01.07.2003. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.
3. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. – 2-изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1978. – 264 с.

*Поступила в редакцию 31.05.2007*

**Рецензент:** д-р ф.-м. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.