

УДК 629.78.064.5

**К. В. БЕЗРУЧКО, С. В. СИНЧЕНКО, А. Л. АЗАРНОВ,
В. И. ЛАЗНЕНКО, А. А. ТИМЧЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ**

Проведен обзор методов построения математических моделей для исследования электрохимических аккумуляторов. Выделены основные подходы для описания разрядных характеристик электрохимических аккумуляторов на основе эмпирических соотношений и схем замещения. Выбрана структура математической модели электрохимического аккумулятора при разряде. Проведен сравнительный анализ построения математических моделей, основанных на эмпирических зависимостях и на основе схемы замещения литий-ионных аккумуляторов. Представлены расчетные и экспериментальные характеристики этих аккумуляторов.

Ключевые слова: электрохимический аккумулятор, химическая батарея, разрядная характеристика, математическая модель, схема замещения.

Введение

Определение срока эксплуатации электрохимических аккумуляторов представляет большие трудности, прежде всего из-за необходимости снятия электрохимического аккумулятора с объекта, изменения режима его эксплуатации и т.д. Для определения параметров и характеристик электрохимических аккумуляторов (АК) необходимо разработать математическую модель (ММ) электрохимического аккумулятора, которая описывает характеристики данных аккумуляторов. В публикациях [1-4] для различных типов электрохимических аккумуляторов (никель-кадмиевых, свинцово-кислотных, литий-ионных), применяемых в объектах ракетно-космической техники, авторами описываются разные подходы к созданию математических моделей электрохимических аккумуляторов.

При разработке математических моделей литий-ионных аккумуляторов широко применяются эквивалентные схемы замещения для построения расчетных разрядных характеристик [5-6]. В тоже время практически отсутствуют исследования по применению других подходов. Для описания разряда щелочных аккумуляторов существует ряд известных соотношений [1-2], описывающих характеристики этих аккумуляторов.

1. Постановка задачи

Существует много подходов к вопросам построения математических моделей электрохимических аккумуляторов:

- аналитические;
- статистические;

- на базе схем замещения;
- экспериментальные;
- комбинированные и др.

Авторами выполнен анализ применения известных эмпирических зависимостей, описывающих разряд литий-ионных аккумуляторов, и проведено сравнение с методом применения соответствующей эквивалентной схемы замещения литий-ионного аккумулятора.

Литий-ионные аккумуляторы по комплексу эксплуатационных параметров существенно превосходят другие типы электрохимических систем, но имеют ряд важных особенностей и ограничений, накладываемых при их эксплуатации.

При разработке математической модели электрохимического аккумулятора учитывались основные особенности:

- модель должна использовать доступные исходные данные;
- модель должна адекватно отражать фактические характеристики литий-ионных аккумуляторов и др.

2. Построение математической модели разрядной характеристики

На разрядное напряжение электрохимического аккумулятора влияет, в основном, ток разряда (I) (факторы, связанные с нештатными режимами эксплуатации здесь не рассматриваются).

Структура математической модели будет иметь вид, представленный на рис.2.

Выходным параметром математической модели ЭХ АК или батареи является напряжение разряда

(U), а входным параметром – продолжительность разряда (τ_p).

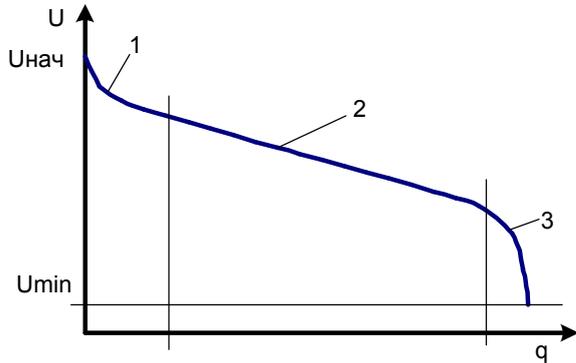


Рис. 1. Типичная разрядная характеристика литий-ионного аккумулятора

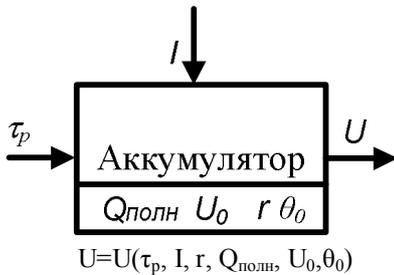


Рис. 2. Структура математической модели электрохимического аккумулятора в режиме разряда

К специфическим параметрам ММ в данном случае относятся параметры состояния и параметры, описывающие особенности АК: начальное напряжение U_0 , внутреннее сопротивление r , начальная заряженность θ_0 и полная емкость $Q_{полн}$ аккумулятора [4].

3. Сравнение предложенных методов построения математической модели

Первая часть исследований. Для математического описания разрядных характеристик щелочных аккумуляторов наиболее широко применяется эмпирическое уравнение Романова (модифицированный вид) [2,6]:

$$U = E - R \cdot I - K \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha \cdot q \cdot I}{(C - q)}\right) \right) + A \cdot \left(\exp\left(-B \frac{q}{C}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

где E – ЭДС АК, В; R – внутреннее сопротивление АК, Ом I – ток разряда, А; C – емкость полностью заряженного аккумулятора, Ач; $q = I \cdot \tau$ – емкость

(Ач), отданная аккумулятором за время разряда τ (ч); α, A, B, D, K – эмпирические коэффициенты.

Результаты расчета и сравнение с экспериментальными данными (разрядной характеристикой АК ICP103448SR) приведены на рис. 3.

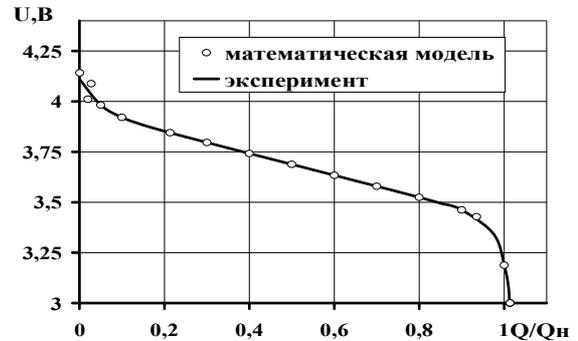


Рис.3. Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики аккумулятора ICP103448SR

Сравнение расчетной разрядной характеристики с результатами эксперимента показывает, что уравнение (1) хорошо описывает разрядную характеристику на всех участках.

Участок 1 начальной поляризации (см. рис.1) описывает выражение (2).

$$U_{i1} = A \cdot \left[\exp\left(-B \frac{q}{C}\right) - 1 \right]. \quad (2)$$

Участки 2 и 3 разрядной характеристики в уравнении (1) описываются соотношением:

$$U_{i2} = K \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha \cdot q \cdot I}{(C - q)}\right) \right). \quad (3)$$

Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 0,6%. Область максимального расхождения расположена на начальном участке характеристики (включение разряда). Графическое рассмотрение характеристик показывает высокую степень соответствия расчетной характеристики экспериментальным данным.

Вторая часть исследований. Исходя из уже проведенных обзоров [1-6] авторами предлагается использовать схему замещения, представленную на рис. 4.

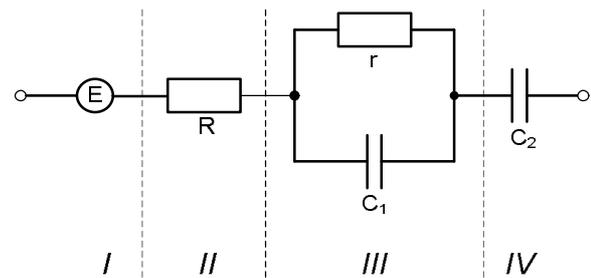


Рис. 4. Схема замещения ЭХ АК

Все участки схемы замещения соединены последовательно, поэтому напряжение на выходе схемы замещения будет определяться алгебраической суммой напряжений. Таким образом, искомая зависимость напряжения от времени и тока для разряда имеет следующий вид:

$$U = E - R \cdot I + b \cdot \left(\exp \left(-\frac{I \cdot t}{C_1 \cdot b} \right) - 1 \right) + \frac{Q}{C_2^0} \cdot (\ln(-Q + I \cdot t) - \ln(-Q)). \quad (4)$$

При формировании математической модели необходимо учитывать, что т.к. аккумулятор до момента начала тестирования уже мог отдать некоторую долю ёмкости q , то с учётом этого разрядная характеристика может быть представлена в виде:

$$U = E - R \cdot I + b \cdot \left(\exp \left(-\frac{q + I \cdot t}{C_1 \cdot b} \right) - 1 \right) + \frac{Q}{C_2^0} \cdot (\ln(-Q + q + I \cdot t) - \ln(-Q)). \quad (5)$$

при ограничениях:

$$I \in [0; I_{\max}]; \\ t \in [0; t_{\max}].$$

Коэффициенты для двух полученных ММ (1) и (5) в работе были определены на основе данных отдельно проведенных экспериментов и рассчитаны с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты расчета и сравнение с экспериментальными данными (разрядной характеристикой литий-ионной БХ LIR103450A) приведены на рис. 5.

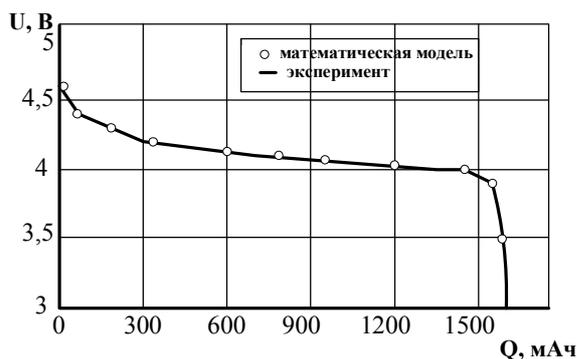


Рис.5. Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики литий-ионной БХ LIR103450A

Исходя из анализа участок 1 (см.рис.1) начальных переходных процессов разрядной характеристики литий-ионной БХ LIR103450A (см. рис. 5) растянут во времени и частично накладывается на следующий псевдолинейный участок 2.

Следует заметить, что ММ литий-ионной БХ LIR103450A обладает наименьшим максимальным отклонением расчетной характеристики от результатов независимого эксперимента (не превышает 0,5%).

Таким образом, математическая модель разрядной характеристики, построенная на основе уравнения Романова, не уступает аналогичным моделям на основе схемы замещения.

Заключение

Проведенный анализ показал, что математическая модель, основанная на описанной в данной статье схеме замещения, имеет меньшее расхождение от экспериментальной разрядной кривой, и обладает наибольшей точностью при описании начального участка разрядной кривой. Применение математической модели на основе уравнения Романова также возможно, но ММ описывает разрядную кривую с меньшей точностью (наглядно видно на рис. 3) и с меньшей трудоемкостью.

Таким образом, математические модели разрядных характеристик, построенные на основе уравнения Романова (1) и на основе схемы замещения (5), равнозначно могут быть использованы для описания разрядной характеристики литий-ионных аккумуляторов и батарей на их основе.

Литература

1. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование [Текст] / К. В. Безручко, Н. В. Белан, Д. Г. Белов [и др.] ; под ред. акад. НАН Украины С. Н. Конюхова. – Х. : Гос. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2000. – 515 с.
2. Романов, В. В. Химические источники тока [Текст] / В. В. Романов, Ю. М. Хашев. – М. : Сов. радио, 1978. – 264 с.
3. Галушкин, Н. Е. Анализ эмпирических зависимостей, описывающих разряд щелочных аккумуляторов [Текст] / Н. Е. Галушкин, Н. Н. Галушкина / Электрохимическая энергетика. – 2005. – Т. 5, № 1. – С. 43-50.
4. Использование схем замещения для математического моделирования разрядных характеристик никель-кадмиевых аккумуляторов [Текст] / К. В. Безручко, А. О. Давидов, С. В. Синченко [и др.] // Вісник Національного технічного університету «ХПИ» : зб. наук. пр.. – Х. : НТУ «ХПИ», 2012. – Вип. 23. – С. 17-28.
5. Rahmoun, A. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams [Text] / A. Rahmoun, H. Biechl // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2012. – R. 88, NR 7b. – P. 152-156.

6. Ширинский, С. В. Построение математических моделей разрядных характеристик литий-ионных аккумуляторов на основе эмпирических соотношений [Текст] / С. В. Ширинский / Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 7 (114). – С. 150-153.

Поступила в редакцию 01.06.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. 603 И. Б. Туркин, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ

К. В. Безручко, С. В. Сінченко, О. Л. Азарнов, В. І. Лазненко, А. О. Тімченко

Проведено огляд методів побудови математичних моделей для дослідження електрохімічних акумуляторів. Виділено основні підходи для опису розрядних характеристик електрохімічних акумуляторів на основі емпіричних співвідношень і схем заміщення. Обрано структуру математичної моделі електрохімічного акумулятора при розряді. Проведено порівняльний аналіз побудови математичних моделей, заснованих на емпіричних залежностях і на основі схеми заміщення літій-іонних акумуляторів. Представлено розрахункові та експериментальні характеристики цих акумуляторів.

Ключові слова: електрохімічний акумулятор, хімічна батарея, розрядна характеристика, математична модель, схема заміщення.

COMPARISON OF METHODS OF CONSTRUCTING MATHEMATICAL MODELS FOR STUDIES OF ELECTROCHEMICAL BATTERIES

K. V. Bezruchko, S. V. Sinchenko, A. L. Azarnov, V. I. Laznenko, A. A. Timchenko

An overview of the methods of constructing mathematical models for the study of electrochemical batteries. The basic approaches to describe the discharge characteristics of electrochemical batteries based on empirical relationships and equivalent circuits. Selected structure of the mathematical model of the electrochemical battery during discharge. A comparative analysis of mathematical models based on empirical dependencies and based on the equivalent circuit of lithium-ion batteries. It shows the calculated and experimental characteristics of these batteries.

Keywords: electrochemical accumulator, chemical battery, discharge characteristic, mathematical model, equivalent circuit.

Безручко Константин Васильевич – д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» г. Харьков.

Сінченко Светлана Владимировна - ст. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

Азарнов Александр Леонидович - ст. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

Лазненко Виктор Иванович - ст. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

Тімченко Анастасія Александрівна – магістр, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.