

УДК 629.78.064.5

С.В. СИНЧЕНКО, С.В. ШИРИНСКИЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРИ ПОМОЩИ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Проведен анализ применения схемы замещения для математического моделирования работы электрохимических аккумуляторов различных типов. Приведена структура математической модели и последовательность построения математической модели на основе схемы замещения электрохимических аккумуляторов и химических батарей при их разряде. Рассмотрены особенности применения схемы замещения для описания разрядных характеристик никель-кадмиевых, свинцово-кислотных, литий-ионных электрохимических аккумуляторов и батарей на их основе и возможность упрощения расчетов для их оценки.

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

Введение

Определение параметров и характеристик электрохимических аккумуляторов, отвечающих за его текущее состояние необходимо для решения широкого спектра задач, связанных как с проектированием, так и с эксплуатацией электрохимических аккумуляторов [1].

Экспериментальные методы определения разрядных (зарядных) характеристик требуют существенных затрат времени и ресурсов, особенно при необходимости получения семейства разрядных характеристик. Из обзора публикаций [2 – 6] можно сделать вывод, что применение соответствующей эквивалентной схемы замещения электрохимического аккумулятора предоставляет возможность аналитически исследовать электрохимический аккумулятор по следующим направлениям:

- математический анализ различных режимов разряда и заряда электрохимических аккумуляторов;
- анализ переходных процессов при заряде и разряде электрохимических аккумуляторов;
- анализ стабильности параметров электрохимических аккумуляторов в течение времени их работы, хранения, влияния температуры окружающей среды на электрические характеристики электрохимических аккумуляторов.

Таким образом, математическое описание параметров и характеристик электрохимических аккумуляторов и химических батарей при помощи схемы замещения наиболее удобно для их определения.

В данной работе авторами предлагается применение математической модели на основе схемы за-

мещения для определения разрядной характеристики электрохимических аккумуляторов в короткие сроки расчетным путем.

1. Постановка задачи

Одной из важнейших проблем математического моделирования электрохимических аккумуляторов является значительные количественные и качественные различия разрядных характеристик аккумуляторов различных электрохимических систем. В данной работе рассматриваются характеристики аккумуляторов наиболее распространенных электрохимических систем: никель-кадмиевые, свинцово-кислотные и литий-ионные.

Для построения математических моделей электрохимических аккумуляторов была выбрана следующая последовательность действий:

1. Определение структуры математической модели.
2. Определение связующих уравнений.
3. Формирование математической модели.
4. Определение значений коэффициентов в математической модели.
5. Проверка адекватности математической модели.

2. Определение структуры математической модели

Структура математической модели будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Выходным параметром математической модели электрохимических аккумуляторов или батареи,

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

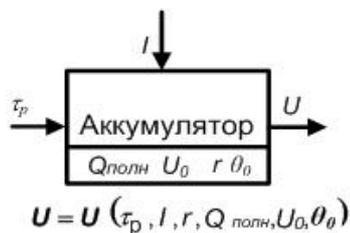


Рис. 1. Структура математической модели электрохимического аккумулятора в режиме разряда

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

К специфическим параметрам математической модели в данном случае относятся диапазоны параметров состояния и параметры, описывающие особенности аккумуляторов: начальное напряжение U_0 , внутреннее сопротивление r , начальная заряженность θ_0 и полная емкость $Q_{\text{полн}}$ аккумулятора [7].

3. Определение связующих уравнений математической модели

Для построения уравнений, связывающих параметры математической модели, были использованы эквивалентные электрические схемы замещения, представляющие собой определенным образом соединенные активные и реактивные элементы, каждый из которых имитирует определенный физико-химический параметр исследуемого аккумулятора или конструктивный элемент электрохимического аккумулятора.

Для удобного анализа и аналитического представления выбранную схему замещения аккумулятора разбили на четыре участка (см. рис.2).

Первый участок состоит из элемента, представляющего собой источник идеальной ЭДС, напряжение которого равно $U_1=E$.

Второй участок представлен резистором R , который описывает активационно-омическую часть в работе АК. Падение напряжение на этом элементе:

$$U_2 = R \cdot I, \quad (1)$$

где I – постоянный внешний ток.

Третий участок схемы замещения АК представляет собой конденсатор C_1 с утечкой электроэнергии на резисторе r . Этот участок описывает переходные процессы, протекающие в аккумуляторе при его включении на разряд [5-7]. При пропускании через схему замещения постоянного разрядного тока уравнение, описывающее процессы на участке имеет вид:

$$U_3 = -b \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{I \cdot t}{C_1 \cdot b}\right) \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает изменение напряжения на выходе схемы замещения электрохимического аккумулятора, условно называемое релаксационной поляризацией.

Последний четвертый участок схемы замещения представлен конденсатором C_2 , который соответствует основной токообразующей электрохимической реакции. При пропускании через схему постоянного разрядного тока уравнение, описывающее процессы в блоке имеет вид:

$$U_4 = \frac{Q}{C_2^0} \cdot (\ln(-Q + I \cdot t) - \ln(-Q)), \quad (3)$$

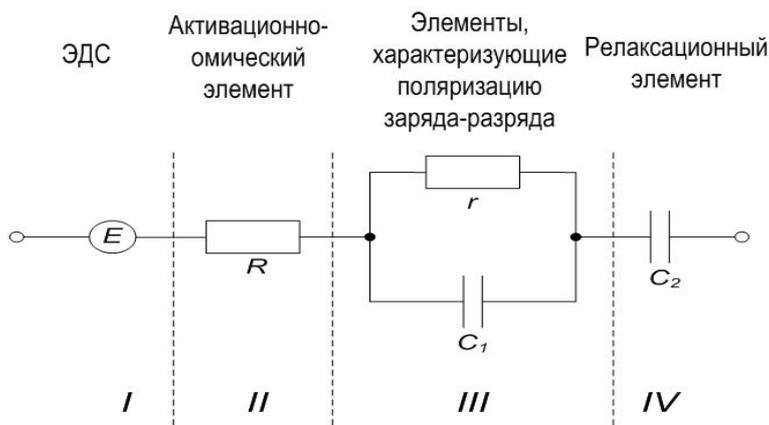


Рис. 2. Схема замещения электрохимического аккумулятора

где C_2^0 – коэффициент, соответствующий начальной ёмкости конденсатора C_2 ;

Q – ёмкость аккумулятора, которую он способен отдать при разряде в А·с.

Все участки схемы замещения соединены последовательно, поэтому напряжение на выходе схемы замещения будет определяться алгебраической суммой. 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 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:

$$\begin{aligned} I &\in [0; I_{\max}]; \\ t &\in [0; t_{\max}]. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты математической модели были определены на основе экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов для аккумуляторов НКП-90 (никель-кадмиевый полугерметичный), НКГ-160 (никель-кадмиевый герметичный), и батарей FTS 12-7,2 (свинцово-кислотная необслуживаемая) и LIR103450A (литий-ионная).

4. Проверка адекватности математической модели

При проверке адекватности математической модели разрядной характеристики никель-кадмиевых полугерметичных аккумуляторов НКП-90 было установлено, что с доверительной вероятностью 0,99 математическая модель адекватна на всем протяжении разрядной характеристики. Наибольшее отклонение расчетной характеристики от результатов независимого эксперимента не превышает 1% (на начальном участке).

Для анализа адекватности математической модели представленных в работе типов электрохимических аккумуляторов и химических батарей были использованы результаты контрольных экспериментов

на тех же аккумуляторах и химических батареях.

Разрядная характеристика аккумуляторов НКП-90 (рис. 3) обладает четко выраженным участком начальных переходных процессов (начальной поляризации) на начальной стадии разряда, описываемый уравнением (2). После завершения переходных процессов разряд переходит в псевдолинейную стадию, которая описывается уравнением (3).

Проверка адекватности математической модели разрядной характеристики никель-кадмиевых герметичных аккумуляторов НКГ-160 показала, что с доверительной вероятностью 0,99 математическая модель адекватна на всем протяжении разрядной характеристики.

Наибольшее отклонение расчетной характеристики от результатов независимого эксперимента не превышает 1% (при переходе от начального участка к псевдолинейному).

Форма разрядной характеристики аккумулятора НКГ-160 незначительно отличается от аналогичной характеристики аккумулятора НКП-90: на начальной стадии разряда описывается уравнением (2), после завершения переходных процессов разряд описывается уравнением (3).

Математическая модель разрядной характеристики свинцово-кислотных батарей FTS 12-7,2 адекватна с доверительной вероятностью 0,99 на всем протяжении разрядной характеристики.

Для разрядной характеристики БХ FTS 12-7,2 (рис. 5) типично скачкообразное снижение напряжение в начале разряда. Участок начальных переходных процессов в масштабах времени, характерных для разрядных характеристик практически отсутствует. Тем не менее, уравнение (2) достаточно точно описывает начальный скачек напряжения.

Для оценочных расчетов переходными процессами в начале разряда можно пренебречь. Практически весь процесс разряда происходит на псевдолинейном участке (см. рис. 5).

Таким образом, при проведении оценочных расчетов вместо уравнения (5) можно использовать уравнение:

$$U = E - R \cdot I + \frac{Q}{C_2^0} \cdot (\ln(-Q + q + I \cdot t) - \ln(-Q)). \quad (7)$$

Следует заметить, что величины коэффициентов уравнений (5) и (7) различны, поскольку необходимо компенсировать исключенное из расчетов падение напряжения химической батареи в процессе начальных переходных процессов.

Упрощенное выражение (7) адекватно описывает (с доверительной вероятностью 0,99) разрядную характеристику на всем ее протяжении, за исключением короткого начального участка.

При проверке адекватности математической модели разрядной характеристики литий-ионной химической батареи LIR103450A было установлено, что с доверительной вероятностью 0,99 математическая модель адекватна на всем протяжении разряд-

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

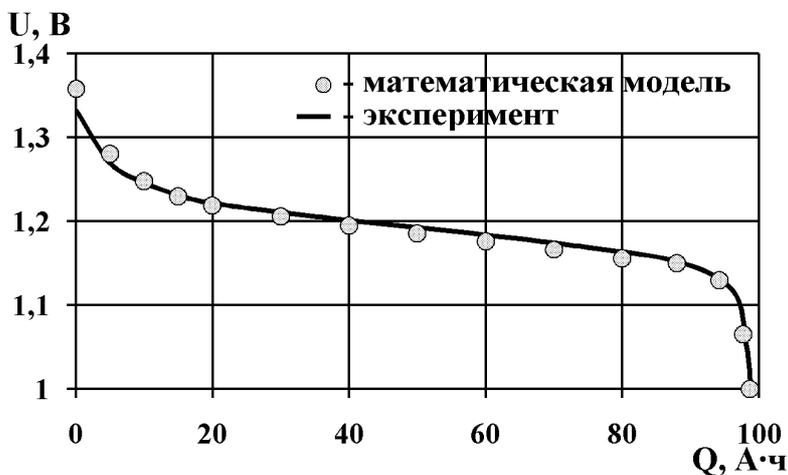


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики никель-кадмиевого аккумулятора НКП-90

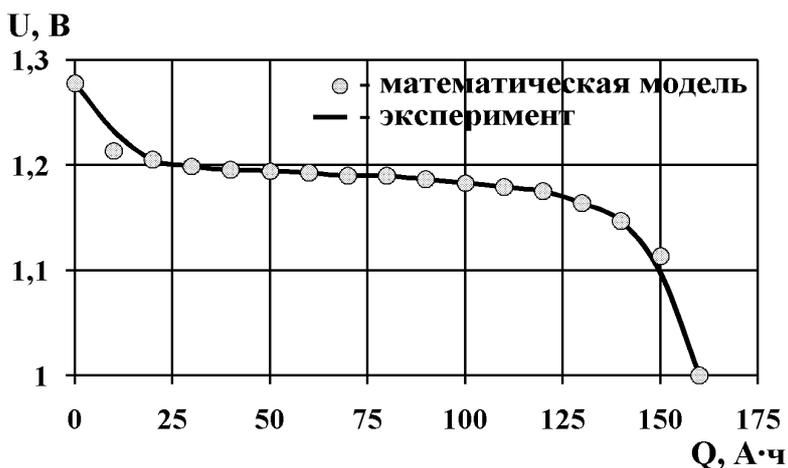


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики никель-кадмиевого аккумулятора НКГ-160

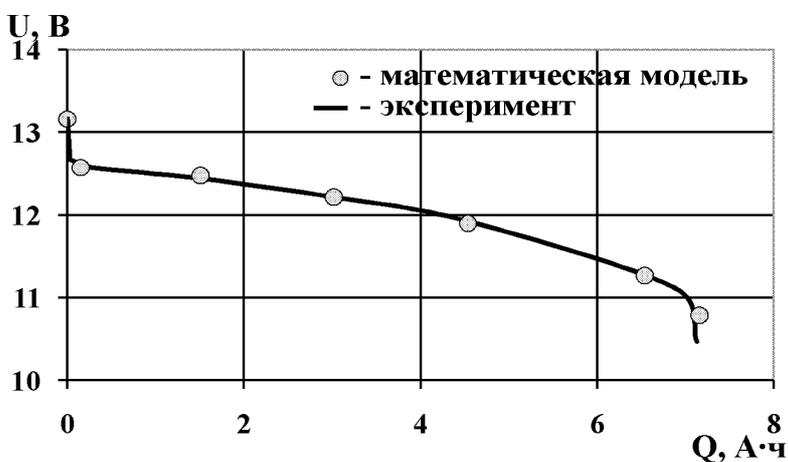


Рис. 5. Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики свинцово-кислотной химической батареи FTS 12-7,2

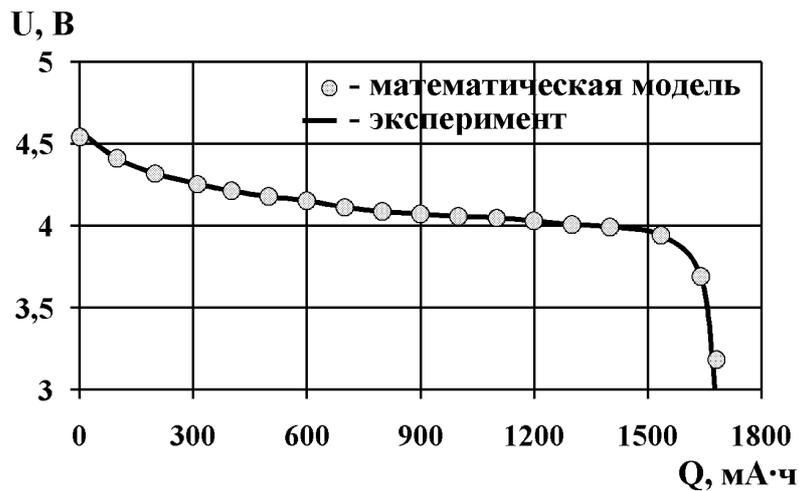


Рис. 6. Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики литий-ионной химической батареи LIR103450A

Участок начальных переходных процессов разрядной характеристики литий-ионной химической батареи LIR103450A (см. рис. 6) растянут во времени и частично накладывается на следующий (псевдолинейный) участок.

При проведении оценочных расчетов с помощью упрощенного выражения (7) отклонение расчетных значений от результатов эксперимента увеличивается до 10%, что мало приемлемо.

Таким образом, даже для оценочных расчетов разрядных характеристик следует использовать более точное выражение (5).

Заключение

В данной работе авторам была предложена структура математической модели и последовательность построения математической модели на основе схемы замещения электрохимических аккумуляторов и химических батарей при их разряде. Выбор схемы замещения, которая описывается при помощи фундаментальных законов теории электрических цепей, обосновывается упрощениями в математическом описании взаимосвязи напряжения разряда электрохимических аккумуляторов и продолжительности разряда, то есть разрядной характеристики электрохимических аккумуляторов.

Проведенный анализ показал, что математическая модель, основанная на описанной в данной статье схеме замещения подходит для описания разрядных характеристик аккумуляторов различных электрохимических систем в широком диапазоне емкостей (рассмотрены электрохимические аккумуляторы емкостями от 1,8 до 160 А·ч).

Установлено, что при описании разрядных характеристик свинцово-кислотных батарей допустимо использования упрощенного уравнения, не учи-

тывающего начальные переходные процессы. Также выявлено, что для построения математической модели разрядных характеристик никель-кадмиевых и особенно литий-ионных аккумуляторов упрощенное выражение непригодно.

Литература

1. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование [Текст] / К.В. Безручко, Н.В. Белан, Д.Г. Белов, С.В. Губин, В.И. Драновский, В.С. Кривцов, И.Т. Перекопский, И.Б. Туркин; под ред. акад. НАН Украины С.Н. Конюхова. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2000. – 515 с.
2. Bergveld, H.J. Electronic-network modelling of rechargeable NiCd cells and its application to the design of battery management system [Text] / H.J. Bergveld, W.S. Kruijt, P.H.L. Notten // *Journal of Power Sources*-77, 1999. – P. 143-158.
3. Туркин, И.Б. Метод параметрической идентификации схемы замещения химических источников тока [Текст] / И. Б. Туркин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: зб. наук. праць Держ. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – № 15. – Х., 2000. – С. 136-140.*
4. Безручко, К.В. Математическая модель импедансных характеристик никель-кадмиевого аккумулятора [Текст] / К.В. Безручко, И.Б. Туркин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: зб. наук. праць Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – № 30. – Х., 2002. – С. 273–277.*
5. 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.*
6. Галушкина, Н.Н. Структурная модель щелочного аккумулятора. Релаксационная поляризация [Текст] / Н.Н. Галушкина, Д.Н. Галушкин // *Элек-*

трохимическая энергетика. – 2005. – Т. 6, № 1. – С. 41-45.

7. Использование схем замещения для математического моделирования разрядных характеристик никель-кадмиевых аккумуляторов [Текст] /

К.В. Безручко, А.О. Давидов, С.В. Синченко, С.В. Ширинский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Вип. 23. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 17-28.

Поступила в редакцию 05.06.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

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

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗРЯДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ РІЗНИХ ТИПІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ

С.В. Синченко, С.В. Ширинський

Проведено аналіз застосування схеми заміщення для математичного моделювання роботи електрохімічних акумуляторів різних типів. Наведено структуру математичної моделі й послідовність побудови математичної моделі на основі схеми заміщення електрохімічних акумуляторів і хімічних батарей при їхньому розряді. Розглянуто особливості застосування схеми заміщення для опису розрядних характеристик нікель-кадмієвих, свинцево-кислотних, літій-іонних електрохімічних акумуляторів і батарей на їхній основі й можливість спрощення розрахунків для їхньої оцінки.

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

CREATION OF MATHEMATICAL MODELS OF DISCHARGE CHARACTERISTICS OF ELECTROCHEMICAL ACCUMULATORS OF VARIOUS TYPES BY MEANS OF EQUIVALENT CIRCUITS

S.V. Sinchenko, S.V. Shirinsky

The analysis of application of an equivalent circuit for mathematical modeling of operation of electrochemical accumulators of various types is carried out. The structure of mathematical model and sequence of creation of mathematical model on the basis of an equivalent circuit of electrochemical accumulators and chemical batteries is given at their discharge. Features of application of an equivalent circuit for the description of discharge characteristics nickel - cadmium, lead-acid, lithium - ion electrochemical accumulators and batteries on their basis and possibility of simplification of calculations for their assessment are considered.

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

Синченко Светлана Владимировна - ст. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: s.sinchenko@gmail.com.

Ширинский Семен Владимирович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: neuromancer@list.ru.