

УДК 629.78.064.5

**А.О. ДАВИДОВ, Т.С. КАДИГРОБ, В.И. ЛАЗНЕНКО**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ РАБОТАЮЩИХ В ДЕЖУРНОМ РЕЖИМЕ**

*В работе приведена методика прогнозирования характеристик аккумуляторов входящих в состав химической батареи работающей в дежурном режиме. Эта методика основана на расчетном применении математической модели химической батареи, полученной с использованием экспериментальных данных при ресурсных испытаниях аккумуляторов. Представлена сама математическая модель с эмпирическими коэффициентами, а также обработанные данные эксперимента по ускоренному старению. По разработанной методике и синтезированной математической модели сделан прогноз напряжения разомкнутой цепи аккумуляторов входящих в состав химической батареи.*

**Ключевые слова:** электрохимический аккумулятор, методика, прогнозирование, дежурный режим, математическая модель.

### **Введение**

Система электроснабжения (СЭС) является одним из ключевых компонентов большинства объектов ракетно-космической техники (РКТ), которая обеспечивает функционирование практически всех устройств, входящих в ее состав.

В настоящее время в эксплуатации находится множество объектов РКТ, разработанных и изготовленных в 80-е годы с гарантийным сроком эксплуатации 15 лет [1]. Прямое определение ресурса электрохимических аккумуляторов (АК) входящих в их состав требует больших финансовых и временных затрат. В связи с этим возникла проблема достоверного определения параметров состояния аккумуляторов в любой момент времени их экспериментальной отработки и эксплуатации с последующим прогнозированием их характеристик.

### **1. Проблема прогнозирования характеристик НК АК по значениям параметров их текущего состояния в составе БХ СЭС объектов РКТ**

В настоящее время срок службы объектов РКТ ограничивается преимущественно ресурсом БХ в составе их СЭС. Поэтому особое внимание уделяется длительной безотказной работе СЭС. При различных режимах эксплуатации в НК АК протекают характерные им деградационные процессы, которые и обуславливают фактический срок службы аккумуляторов и батарей на их основе. Все они ведут к потере емкости, изменению и ухудшению зарядно-разрядных характеристик, увеличению тока само-

разряда и даже к полному отказу аккумулятора [2]. Это ухудшение неизбежно, но его можно диагностировать, а затем, имея указанную информацию, прогнозировать изменения характеристик и определять остаточный ресурс.

Общепринятые экспериментальные методы оценки ресурса аккумуляторов предполагают испытания в масштабе реального времени. Продолжительность таких испытаний неоправданно велика. Применение ускоренных ресурсных испытаний [3, 4] позволяет существенно сократить продолжительность мероприятий по определению ресурса. Однако, при отсутствии возможности проведения экспериментальных исследований (например, для бортовых аккумуляторов космического аппарата в орбитальном полете) или в условиях дефицита времени, для определения ресурса аккумуляторов следует использовать методы прогнозирования, которые позволяют существенно сократить время испытаний аккумуляторов.

Теоретические аспекты рассматриваемой проблемы требуют развития технологии синтеза математических моделей НК БХ и других компонентов модуля накопления СЭС с целью создания моделей, адекватно описывающих его работу в динамическом режиме, а также создания новых методических средств для решения соответствующих инженерных задач.

Экспериментальные аспекты проблемы требуют развития комплексной стендовой базы для определения прогнозных характеристик НК БХ.

Актуальность проблемы обоснована необходимостью выполнения заложенных высоких требований по ресурсу и качеству электроэнергии к СЭС РКТ и космических аппаратов, эксплуатирующихся и проектируемых в настоящее время в

рамках выполнения Государственной космической программы Украины в сочетании с общим требованием максимальной эффективности национальных космических проектов в условия дефицита финансовых ресурсов.

## 2. Методика прогнозирования ресурса электрохимических аккумуляторов

Решение задачи прогнозирования характеристик электрохимических аккумуляторов является весьма трудоемким, так как возникает необходимость составления максимально подробной математической модели аккумулятора, которая учитывает влияние деградиционных процессов.

Основная задача прогнозирования – выявление изменения во времени прогнозируемых характеристик и параметров аккумулятора с целью получения максимального эффекта по заранее выбранному критерию.

Для решения проблемы прогнозирования состояния аккумуляторов и батарей разработан метод прогнозирования ресурса по значениям параметров их текущего состояния. Применение данного метода в процессе эксплуатации позволяет определять наиболее благоприятные режимы работы химических батарей.

Одним из наиболее перспективных решений данной проблемы является своевременное диагностирование деградиционных изменений, прогнозирование их дальнейшего развития и изменения эксплуатационных параметров.

Методика **прогнозирования ресурса электрохимических аккумуляторов** по параметрам их текущего состояния основана на расчетном применении математической модели, полученной с использованием экспериментальных данных при ресурсных испытаниях аккумуляторов. Построение математической модели может осуществляться при помощи ряда методов (рис. 1).

На рис. 2 приведена последовательность действий необходимых для разработки и применения методики прогнозирования ресурса электрохимических аккумуляторов.

Эксплуатация большинства аккумуляторных батарей состоит в циклическом чередовании периодов заряда и разряда. Оценить эффективность работы батарей при таких режимах можно путем анализа их емкостных характеристик. Поэтому основным прогнозируемым параметром является емкость аккумулятора. В ходе разработки математической модели АК учитывалась зависимость емкости от множества параметров.

Все эти зависимости вошли в состав математической модели АК (табл. 1).



Рис. 1. Методы построения математической модели АК БХ

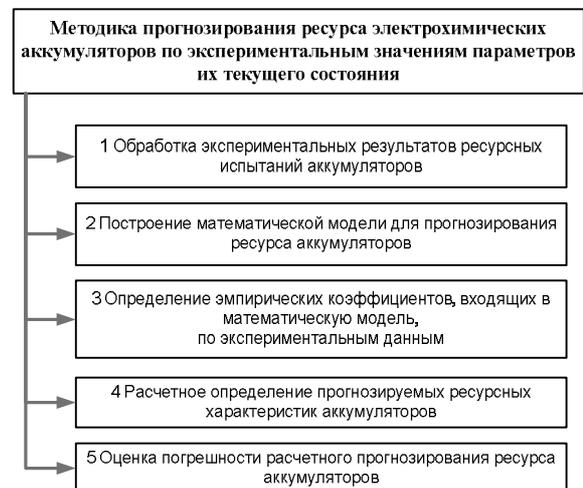


Рис.2. Структура методики прогнозирования ресурса электрохимических аккумуляторов

Таблица 1

Уравнения, входящие в математическую модель электрохимического аккумулятора

Параметр	Уравнение
Напряжение разомкнутой цепи	$U(t) = U_0 - \mu \cdot t^{-\lambda_1 \cdot t},$ $\mu = K \cdot n \cdot Q_0 \cdot c,$ $K = 10^{(A_k - b/T_k)}.$
Остаточная емкость	$Q(t) = Q - Q_0 \cdot K \cdot 10^{\frac{n}{\lambda} \cdot (U_0 - U(t))},$ $\lambda = \alpha - \beta / \dot{Q}_e.$
Внутреннее сопротивление	$r = \frac{(U_{\text{разр}} - U) \cdot (Q_0 - Q)}{I \cdot Q_0}$
Разрядное напряжение	$U_{\text{разр}} = \left[ U_0 - \frac{Q}{Q_0 - Q} \cdot Ir \right] - Ir$
Продолжительность эксплуатации	$\tau_{\text{Э}} = \tau_{\text{И}} \cdot 10^{\frac{b}{0.45} \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{Э}}} - \frac{1}{T_{\text{И}}} \right)}$

**Примечание:** в табл. 1 приняты следующие основные обозначения:

$U$  – напряжение, В;

$T$  – температура, К;  $I$  – ток, А;

$t$  – время, с;

$Q$  – емкость, А·ч;

$r$  – внутреннее сопротивление, Ом;

$\tau_3$  – время эксперимента,

$c, \mu, \lambda, K, n, s, A, b, \alpha, \beta, \gamma$  – эмпирические коэффициенты полученные при обработке экспериментальных данных.

Разработанная математическая модель, позволяющая прогнозировать значения основных параметров аккумуляторов и батарей (емкость, внутреннее сопротивление, напряжение разомкнутой цепи и др.) и характеристик (зарядно-разрядных и др.) через достаточно длительные промежутки времени их работы.

### 3. Численный эксперимент по ускоренному старению

Для проверки математической модели был проведен эксперимент по ускоренному старению никель-кадмиевых аккумуляторов (при температуре 60°C), в ходе которого ежедневно измерялось напряжение разомкнутой цепи (НРЦ) АК БХ при помощи специализированного измерительного устройства, затем полученные данные обрабатывались и строились соответствующие графические зависимости (рис. 3).

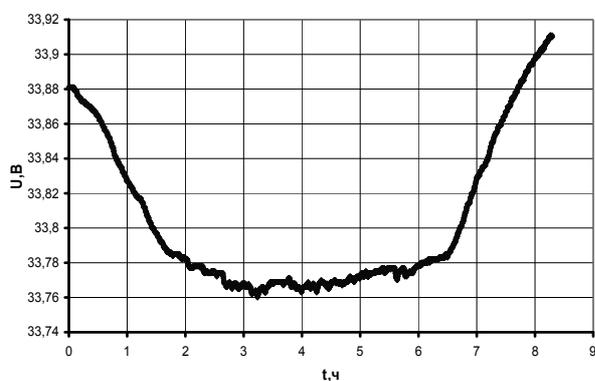


Рис. 3. Обработанные экспериментальные данные за один день эксперимента

Для того, чтобы получить полную картину поведения АК, все данные по эксперименту необходимо свести в один график (не учитывая при этом время выхода на режим и время после отключения термокамеры), (рис. 4).

Далее по приведенной выше математической модели были проведены расчеты по текущему, длительному и сверхдлительному прогнозированию НРЦ АК БХ на основе данных об их текущем состоянии. Полученные расчетные данные сравнива-

лись с реальными разрядными характеристиками, определенными в ходе ресурсных испытаний. Графики расчетных характеристик аккумуляторов, прогнозирующие их экспериментальные характеристики приведены на рис. 5.

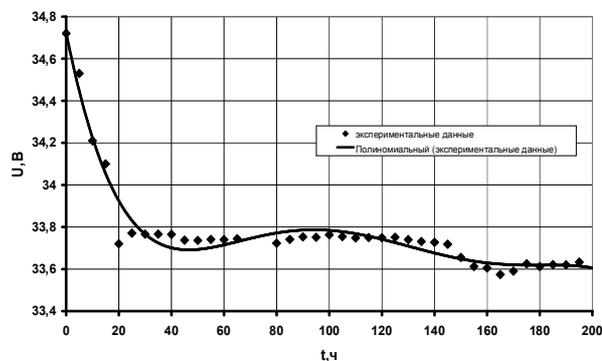


Рис. 4. Обработанные данные за 200 часов эксперимента при температуре 60°C

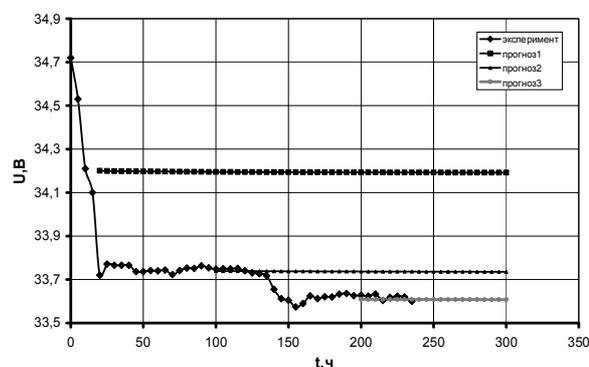


Рис. 5. Прогнозирование НРЦ из точек экспериментальной кривой в точки расчетной

### Заключение

Разработанная методика прогнозирования характеристик электрохимических аккумуляторов может быть использована с целью прогнозирования НРЦ БХ, работающей в дежурном режиме. Был проведен эксперимент по ускоренному старению НКП-90 входящих в состав БХ. Эксперимент проводился в течении 200 часов. По разработанной методике и синтезированной математической модели АК БХ с использованием экспериментальных данных был осуществлен прогноз НРЦ БХ.

### Литература

1. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное» / Под общ. ред. С.Н. Конюхова. – Днепропетровск., ООО «КолорГраф», ООО РА «Тандем-У», 2001. – 240 с.
2. Гинделис Я.Е. Химические источники тока / Я.Е. Гинделис. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1984. – 264 с.

3. Ширинский С.В. Применение ускоренных испытаний для оценки остаточного ресурса аккумуляторов / С.В. Ширинский, К.В. Безручко // Вестник Днепропетровского ун-та. – Днепропетровск: ДНУ, 2007. – № 9/2 – С. 181-185.

4. Ширинский С.В. Теоретические аспекты ускоренных испытаний щелочных аккумуляторов на саморазряд / С.В. Ширинский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 2 (28). – С. 37-40.

Поступила в редакцию 1.06.2009

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

### ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У ВАРТОВОМУ РЕЖИМІ

*А.О. Давідов, Т.С. Кадігроб, В.І. Лазненко*

У роботі приведена методика прогнозування характеристик акумуляторів що входять до складу хімічної батареї яка працює у вартовому режимі. Ця методика заснована на розрахунковому застосуванні математичної моделі хімічної батареї, отриманої з використанням експериментальних даних при ресурсних випробуваннях акумуляторів. Наведено саму математичну модель з емпіричними коефіцієнтами, а також оброблені експериментальні дані експерименту по прискореному старінню. За допомогою розробленої методики та синтезованої математичної моделі зроблено прогноз напруги розімкнутого кола акумуляторів, що входять до складу хімічної батареї.

**Ключові слова:** електрохімічний акумулятор, методика, прогнозування, вартовий режим, математична модель.

### FORECASTING OF THE CHARACTERISTICS OF CHEMICAL ACCUMULATORS WORKING IN STANDBY MODE

*A.O. Davidov, T.S. Kadigrob, V.I. Laznenko*

In the given article the methodic of forecasting of characteristics of accumulators in the composition of chemical battery working in the standby mode is given. This methodic is based on calculation using mathematical model of chemical battery. The mathematical model was developed using experimental data of life time tests of accumulators. It is shown the developed mathematical model with empirical coefficients and the treated experiment data on accelerated aging. On the basis of developed methodic and synthesized mathematical model it was forecasted open-circuit voltage of accumulators in the composition of chemical battery.

**Key words:** chemical accumulator, methodic, forecasting, standby state, mathematical model.

**Давидов Альберт Оганезович** – канд. техн. наук, докторант кафедри двигателів і енергоустановок летательних апаратів Національного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: davidov@d4.khai.edu.

**Кадігроб Татьяна Сергеевна** – аспірант кафедри двигателів і енергоустановок летательных апаратів Національного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Lucky317@mail.ru.

**Лазненко Виктор Иванович** – с.н.с. лабораторії автономної енергетики Національного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.