

УДК 629.78.064.5

К.В. БЕЗРУЧКО, А.О. ДАВИДОВ, Т.С. КАДИГРОБ, С.В. ШИРИНСКИЙ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В работе изучены причины деградации электрохимических аккумуляторов систем электроснабжения объектов ракетно-космической техники, приведены методы определения ресурса аккумуляторов. При отсутствии возможности проведения эксперимента или нехватке времени предложено использование метода прогнозирования ресурса аккумуляторов. При этом разработана методика прогнозирования ресурса аккумуляторов, основанная на расчетном применении математической модели, полученной с использованием экспериментальных данных при ресурсных испытаниях аккумуляторов. Представлена разработанная математическая модель с эмпирическими коэффициентами и даны рекомендации по применению методики прогнозирования.

Ключевые слова: электрохимический аккумулятор, деградация, ресурс, методика, прогнозирование.

Введение

Система электроснабжения является одним из ключевых компонентов большинства объектов ракетно-космической техники, которая обеспечивает функционирование практически всех устройств, находящихся на борту космических аппаратов.

Современные системы электроснабжения строятся по схеме прямой передачи энергии от генератора в нагрузку, но состав и конструктивное исполнение их различны в зависимости от назначения и специфики космических аппаратов. Функционально системы электроснабжения состоят из подсистемы генерирования, подсистемы накопления и сервисной аппаратуры. Большинство современных космических аппаратов, как эксплуатирующихся, так и вновь разрабатываемых, имеют срок эксплуатации в пределах от 1 до 5 лет; в некоторых случаях их ресурс достигает 10...15 лет. Достижение такого ресурса, как правило, осуществляется за счет увеличения емкости химических батарей, что приводит к существенному удорожанию системы электроснабжения космического аппарата.

Прямое определение ресурса электрохимических аккумуляторов (АК) 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. Причины деградации аккумуляторов

Снижение рабочих характеристик аккумулято-

ров происходит в результате протекания деградационных процессов и проявляется в падении разрядной емкости, понижении разрядного и повышении зарядного напряжения, повышенном саморазряде, физическом выходе аккумулятора из строя и т.д. Таким образом, фактический срок службы аккумуляторов, как правило, обусловлен протекающими в них различными процессами (рис. 1), приводящими к деградации [1].



Рис. 1. Деградационные процессы, приводящие к истечению ресурса АК

Основываясь на анализе работы никель-кадмиевых аккумуляторов, был сделан вывод, что с течением времени происходит постепенное снижение выходного напряжения, особенно в конце раз-

ряда. Т.е. в большинстве случаев ухудшение характеристик аккумуляторов наступает вследствие постепенного накопления факторов негативного воздействия деградационных процессов. Эти процессы связаны либо с необратимыми (или частично-обратимыми) химическими реакциями, либо со структурными изменениями в активных массах электродов [2, 3]. Это ухудшение неизбежно, но его можно диагностировать, а затем, имея указанную информацию, прогнозировать изменения характеристик и определять остаточный ресурс. Все это позволит существенно сократить время испытаний аккумуляторов. Кроме того, предсказывая остаточную емкость для каждого из аккумуляторов в батарее, становится возможным определять на ранних стадиях разбаланс их емкостей и компенсировать его.

2. Методы определения ресурса аккумуляторов

Оценку ресурса аккумуляторов можно произвести как путем математического моделирования, так и экспериментальным путем (рис. 2).

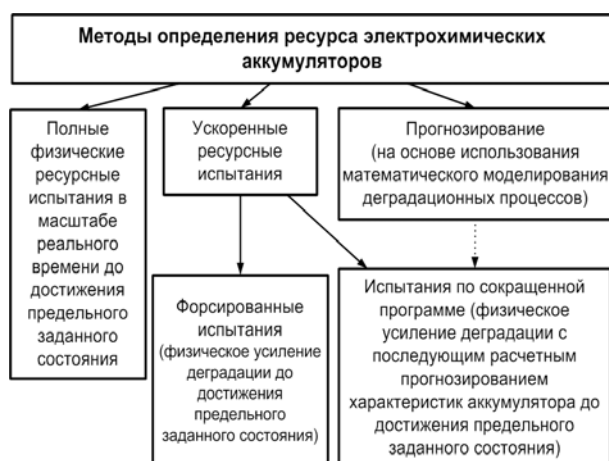


Рис. 2. Методы определения ресурса электрохимических аккумуляторов

Общепринятые экспериментальные методы оценки ресурса аккумуляторов предполагают испытания в масштабе реального времени. Продолжительность таких испытаний неоправданно велика. Применение ускоренных ресурсных испытаний [4, 5] 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.

3. Прогнозирование 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 описанных выше деградационных процессов.

Основная задача прогнозирования – выявление изменения во времени прогнозируемых характеристик и параметров аккумулятора с целью получения максимального эффекта по заранее выбранному критерию. Прогнозирование может осуществляться при помощи ряда методов (рис. 3).



Рис. 3. Методы прогнозирования деградации электрохимических аккумуляторов

Для решения проблемы прогнозирования состояния аккумуляторов и батарей нами 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 деградационных 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.

На рис. 4 приведена последовательность действий, необходимых для разработки и применения методики прогнозирования ресурса электрохимических аккумуляторов.



Рис. 4. Структура 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).

Таблица 1

Уравнения, входящие в математическую модель электрохимического аккумулятора

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

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;

$\tau_{\text{Э}}$ – время эксперимента,

c ; μ , λ , K , n , α , β , γ – эмпирические коэффициенты, полученные при обработке экспериментальных данных.

Разработанная математическая модель позволяет 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. Модель использует экспериментальные данные текущих значений основных параметров аккумуляторов и батарей для определения эмпирических коэффициентов, входящих в модель.

4. Результаты численного эксперимента

Для проверки математической модели были использованы соответствующие экспериментальные данные по определению ресурсных характеристик никель-кадмиевых аккумуляторов.

Проведены расчеты по прогнозированию характеристик этих аккумуляторов на основе данных о его текущем состоянии с использованием синтезированной математической модели.

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

Заключение

Разработанная методика позволяет провести диагностику состояния аккумуляторов и батарей, а также:

- спрогнозировать потерю емкости аккумулятора с течением времени эксплуатации;
- существенно сократить срок испытаний аккумуляторов и батарей;
- спрогнозировать момент отказа аккумулятора;
- спрогнозировать изменение разрядных и зарядных характеристик аккумуляторов;

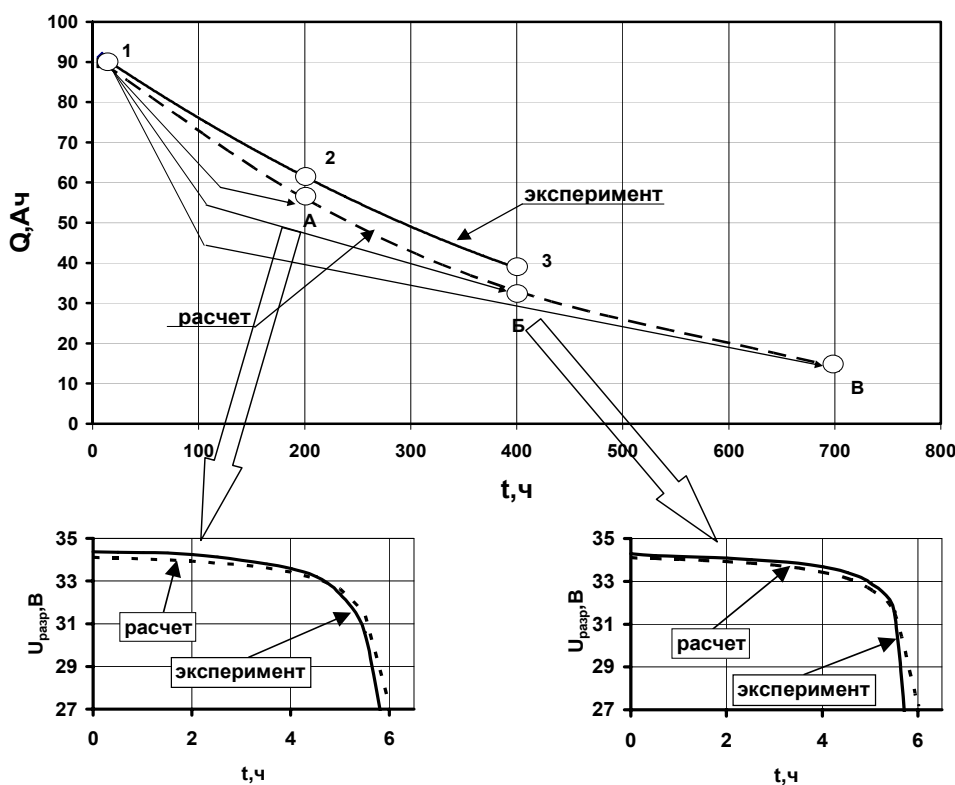


Рис. 5. Прогнозирование емкости из точек экспериментальной кривой в точки расчетной

д) определять и компенсировать на ранних стадиях разбаланс емкостей аккумуляторов в батарее;

е) обеспечить благоприятный режим эксплуатации аккумуляторов.

Исходя из изложенных выше выводов по применению результатов прогнозирования, предлагается использовать данную методику по определению характеристик аккумулятора для:

а) своевременной коррекции логики управления системой электроснабжения при организации оптимальных режимов ее работы;

б) своевременной компенсации разбаланса емкостей аккумуляторов в батарее;

в) определения момента необходимости проведения мероприятий по восстановлению аккумуляторов;

г) ускорения и упрощения экспериментальной отработки системы электроснабжения;

д) использования данной модели на стадиях проектирования новых систем электроснабжения и химических батарей.

Литература

1. Харченко А.А. Аналіз причин деградації нікель-кадмієвих акумуляторів у складі енергоустановок літальних апаратів / А.А. Харченко // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – X., 2002. – Вып. 30. – С. 266-272.
2. Романов В.В. Химические источники тока / В.В. Романов, Ю.М. Хашев. – 2-изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1978. – 264 с.
3. Гинделис Я.Е. Химические источники тока / Я.Е. Гинделис. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1984. – 264 с.
4. Ширинский С.В. Применение ускоренных испытаний для оценки остаточного ресурса аккумуляторов / С.В. Ширинский, К.В. Безручко // *Вестн. Днепропетр. ун-та*. – 2007. – № 9/2. – С. 181-185.
5. 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 28.11.2008

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

ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАКЕТНО-КОСМІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

К.В. Безручко, А.О. Давідов, Т.С. Кадігроб, С.В. Ширінський

У праці вивчено причини деградації електрохімічних акумуляторів систем електрозабезпечення об'єктів ракетно-космічної техніки, наведено методи визначення ресурсу акумуляторів. У разі відсутності можливості проведення експерименту або за браком часу запропоновано використання методу прогнозування ресурсу акумуляторів. Крім того розроблено методику прогнозування ресурсу акумуляторів, що базується на розрахунковому застосуванні математичної моделі з використанням експериментальних даних при ресурсних випробуваннях акумуляторів. Наведено розроблену математичну модель з емпіричними коефіцієнтами, до того ж надано рекомендації що до застосування методики прогнозування.

Ключові слова: прогнозування, система електрозабезпечення, ракетно-космічний комплекс, ресурс, математична модель, емпіричні коефіцієнти.

FORECASTING OF CHARACTERISTICS OF CHEMICAL ACCUMULATORS OF POWER SYSTEMS OF ROCKET AND SPACE COMPLEXES

K.V. Bezruchko, A.O. Davidov, T.S. Kadigrob, S.V. Shirinsky

In the given article the reasons of degradation of chemical accumulators of power systems of objects of space and rocket techniques are studied and methods of determination of life time of accumulators are given. When it is no opportunity to make an experiment or lack of time it is offered to use the method of forecasting the life time of accumulators. It is also developed the methodic of forecasting of life time of accumulators. This methodic is based on the calculation using of mathematical model, which was developed using experimental data of life time tests of accumulators. It is shown the developed mathematical model with empirical coefficients and it is given the recommendations about application of the methodic of forecasting.

Key words: forecasting, power system, rocket and space complexes, life time, mathematical model, empirical coefficients.

Безручко Константин Васильевич – д-р техн. наук, проф., проректор «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: khai@khai.edu.

Давидов Альберт Оганезович – канд. техн. наук, с.н.с. каф. двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: davidov@d4.khai.edu, albert@ai.kharkov.com.

Кадигроб Татьяна Сергеевна – аспирант каф. двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Ширинский Семен Владимирович – м.н.с. каф. двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.