

УДК 629.7.064.018

**К.В. БЕЗРУЧКО¹, И.Б. ТУРКИН¹, А.В. ГОРОВОЙ¹, А.О. ДАВИДОВ¹,
И.В. МОСИЕНКО²**¹*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*²*Государственное конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Украина*

МЕТОДИКА РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ХИМИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Предложена методика ресурсных испытаний (РИ) химической батареи (БХ) космического аппарата (КА), испытательное оборудование, метод и схема измерения и управления. Приведены основные результаты РИ БХ 22НКГ-4СК КА КС5МФ2 типа «Микроспутник».

испытание, никель-кадмиевый аккумулятор, заряд, разряд, ток, напряжение, ресурс, цикл, циклограмма

Введение

К настоящему времени разработано большое количество систем электроснабжения (СЭС) фотоэлектрического типа, различающихся уровнем мощности, ресурсом работы, принципами построения и прочими характеристиками [1].

При исследовании работоспособности и определении технических характеристик СЭС появляется необходимость в сложных и длительных испытаниях отдельных «критических» элементов системы, определяющих надежность всей системы в целом. Одним из таких «критических» элементов для СЭС КА является буферный накопитель энергии – химическая батарея. Данные исследования позволят оценить работоспособность СЭС, включая проверку логики ее функционирования.

1. Постановка задачи

Обзор литературных источников [1-5] показал, что в настоящее время существует проблема проведения длительных испытаний с имитацией всей логики работы систем электроснабжения в реальном масштабе времени.

Задачей данного исследования является:

– разработать методику ресурсных испытаний (РИ) БХ космического аппарата (КА);

- разработать стендовое оборудование;
- апробировать разработанную методику.

2. Программа и методика ресурсных испытаний

Программа и методика РИ устанавливает основные требования к проверке ресурсных характеристик опытного образца БХ, в том числе требования к используемым техническим средствам, определяет методы и условия испытаний.

Целью испытаний является определение соответствия БХ требованиям технического задания на разработку БХ по ресурсу.

В ходе испытаний проводятся:

1. Непрерывное циклирование, в условиях имитации логики управления СЭС КА, в нормальных климатических условиях (НКУ).

Токи заряда соответствуют суммарному току фотоэлектрических батарей для трех вариантов углового положения нормали к плоскости орбиты относительно направления на Солнце: 0, 40 и 90°. При этом основной вариант – 40° используется при циклировании при НКУ, а варианты 0 и 90° используются при проведении циклов при температурах окружающей среды 0 ... 3 °С, 37 ... 40 °С.

2. Контрольные циклы проводятся ежеквартально, а также в начале и конце испытаний. Кон-

трольные циклы включают по два контрольных цикла на температурах окружающей среды 0 ... 3 °С, 25 ± 5 °С, 37 ... 40 °С.

2.1. Измеряемые, контролируемые (управляемые) и расчетные параметры

Программа испытаний устанавливает измеряемые и контролируемые (управляемые) параметры, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Измеряемые параметры

№	Параметр	Обозначение	Диапазон изменения величины	Ед. изм.	Допустимая погрешность
1	Ток заряда-разряда	TBX	0...5	A	±0,01
2	Знак тока заряда-разряда	ZTX	-1, 0, 1	-	-
3	Напряжение БХ	UBX	25...35	B	±0,1
4	Напряжение на каждом аккумуляторе	U _{1...22}	0...2	B	±0,01
5	Величина тока	TNO	0...5	A	±0,01
6	Показания датчиков температуры	t ₁ , t ₂	-	°C	±1
7	Температура окружающей среды	t	0...40	°C	±1
8	Продолжительность заряда и разряда	τ _з , τ _р	0...16	ч	1

В качестве расчетных на контрольных циклах установлены следующие величины:

– зарядная емкость

$$Q_{зар} = \int_0^{\tau_3} TBX \cdot dt; \quad (1)$$

– разрядная емкость

$$Q_{раз} = \int_0^{\tau_p} TBX \cdot dt; \quad (2)$$

– среднее зарядное напряжение БХ

$$U_{ср зар} = \int_0^{\tau_3} UBX \cdot dt / \tau_3; \quad (3)$$

Таблица 2

Контролируемые (управляемые) параметры

№	Параметр	Обозначение	Диапазон изменения величины	Ед. изм.	Допустимая погрешность
1	Температура окружающей среды	t	25 ± 5 0..3 37..40	°C	±1
2	Ток имитатора БФ	I _{БФ}	0...5	A	±0,01
3	Циклограмма энергопотребления	TNO(τ _в)	0...5	A	±0,01
4	Сигнал срабатывания датчика среднего напряжения	ДСН	1 0		UBX < 29,5 В UBX > 29,5 В
5	Сигнал срабатывания датчика предельного напряжения	ДПН	1 0		UBX < 33,8 В UBX > 33,8 В
6	Сигнал срабатывания датчика минимального напряжения	ДМН	1 0		UBX < 24,15 В UBX > 24,15 В
7	Сигнал срабатывания блока поэлементного контроля	БПК	0 1		U _{1...22} > 0,5 В U _{1...22} < 0,5 В
8	Сигналы, формируемые счетчиком ампер-часов	C ₀ C ₁	0; 1 0; 1	-	-

– среднее разрядное напряжение БХ

$$U_{ср разр} = \int_0^{\tau_p} UBX \cdot dt / \tau_p; \quad (4)$$

– КПД по току

$$\eta_i = Q_{разр} / Q_{зар}; \quad (5)$$

– энергетический КПД

$$\eta = (Q_{разр} \cdot U_{ср разр}) / (Q_{зар} \cdot U_{ср зар}); \quad (6)$$

– средняя температура БХ на заряде

$$t_{ср зар} = \int_0^{\tau_3} (t_1 + t_2) \cdot dt / 2\tau_3; \quad (7)$$

– средняя температура БХ на разряде

$$t_{\text{ср раз}} = \int_0^{\tau_p} (t_1 + t_2) \cdot d\tau / 2\tau_p; \quad (8)$$

– наибольшее различие напряжений аккумуляторов БХ на заряде

$$\Delta U_{\text{зар max}} = \max_{\tau_{\text{зар}}} \left(\max_{i=1 \div 22} (U_i) - \min_{i=1 \div 22} (U_i) \right); \quad (9)$$

– наибольшее различие напряжений аккумуляторов БХ на разряде

$$\Delta U_{\text{разр max}} = \max_{\tau_{\text{разр}}} \left(\max_{i=1 \div 22} (U_i) - \min_{i=1 \div 22} (U_i) \right). \quad (10)$$

При циклировании нижеперечисленные расчетные параметры определяются за 1 виток (T_B):

– среднее зарядное напряжение БХ

$$U_{\text{ср зар}} = \int_0^{T_B} UBX \cdot (1 - ZTX) d\tau / 2T_B; \quad (11)$$

– среднее разрядное напряжение БХ

$$U_{\text{ср разр}} = \int_0^{T_B} UBX \cdot (1 + ZTX) d\tau / 2T_B; \quad (12)$$

– средняя температура БХ

$$t_{\text{ср}} = \int_0^{T_B} (t_1 + t_2) \cdot d\tau / 2T_B; \quad (13)$$

– КПД по току

$$\eta_I = \int_0^{T_B} TBX \cdot (1 + ZTX) d\tau / \int_0^{T_B} TBX \cdot (1 - ZTX) d\tau; \quad (14)$$

– энергетический КПД

$$\eta = \eta_I \frac{U_{\text{ср разр}}}{U_{\text{ср зар}}}; \quad (15)$$

– суммарная энергоемкость отданная БХ при циклировании

$$Q_{\Sigma} = \int_0^{T_B} TBX \cdot (1 + ZTX) d\tau / 2; \quad (16)$$

– среднесуточная мощность, потребленная на грузкой

$$N_{\Sigma} = \int_0^{T_B} TNO \cdot UBXd\tau / T_B. \quad (17)$$

2.2. Испытательные средства

Испытательные средства представлены специализированным оборудованием (Рис. 1), включающим:

- зарядное устройство;
- разрядное устройство;
- информационно управляющую систему.

Измерительные приборы, входящие в комплекс, метрологически аттестованы для проведения испытаний БХ.

2.3. Методы и схема измерений

Измерение требуемых параметров БХ осуществляется следующим образом:

- ток БХ, напряжение на БХ и аккумуляторах – цифровым вольтметром через аналоговый коммутатор;
- температура по датчикам ТМ 232 определяется с помощью метода стабильного тока, измеренного по четырехпроводной схеме цифровым вольтметром через аналоговый коммутатор;
- температура окружающей среды – термометром;
- влажность воздуха измеряется психрометром;
- давление воздуха измеряется anerоидным барометром;
- контроль времени осуществляется с помощью системного таймера в персональном компьютере и сверяется по электронным часам.

Схемы измерения параметров химической батареи представлена на рис. 2. Все средства измерений имеют стандартные аттестационные свидетельства.

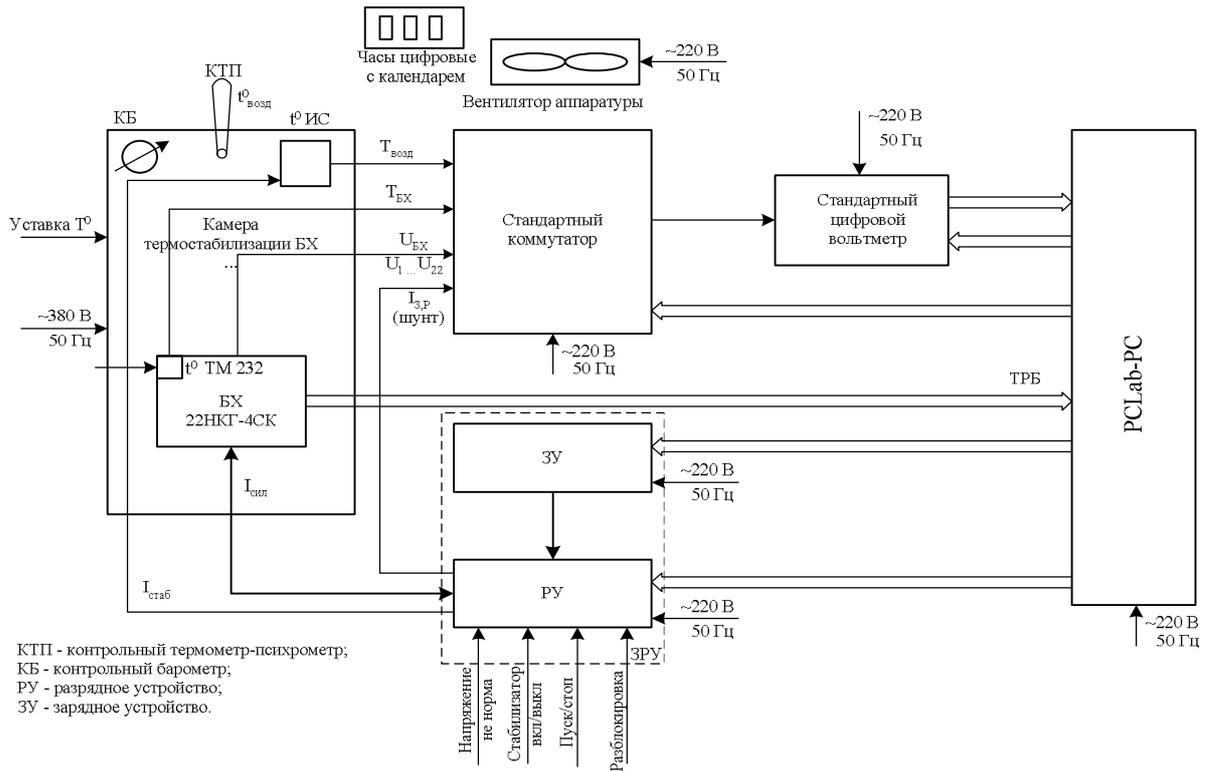


Рис. 1. Испытательные средства

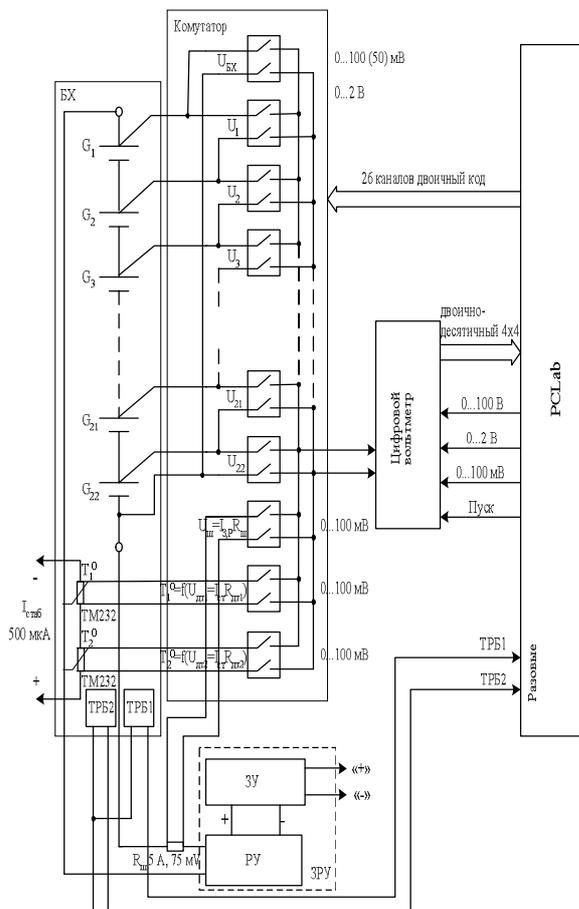


Рис. 2. Измерение параметров БХ

2.3. Метод и схема управления

Управление испытанием осуществляется в автоматизированном режиме на основе применения следующих контуров управления:

- температурный режим работы БХ обеспечивается автономно с помощью автоматической системы термостабилизации;
- внутренний резервный защитный контур управления электрическими режимами работы БХ образует разрядно-имитирующее устройство, которое обеспечивает отключение БХ от силовой цепи при устойчивом (продолжительностью более 5 секунд) снижении напряжения БХ ниже 23.5 В, либо при его росте свыше 34.1 В;
- автоматический контур управления на основе ПЭВМ и специализированного программного обеспечения (СПО) обеспечивает непрерывное циклирование и проведение контрольных циклов. Ввод информации в ПЭВМ от внешнего аналого-цифрового преобразователя осуществляется через модуль цифрового ввода-вывода PCLab, установленный в ком-

пьютере. Выбор канала производится с помощью внешнего коммутатора.

Для имитации выходного тока БФ используется блок питания типа Б5-48, который управляется выходным регистром с дискретностью установки выходного стабильного тока 0,1 А в диапазоне 0...4 А при ограничении выходного напряжения блока питания, равном 36 В. Имитация энергопотребления полезной нагрузки осуществляется с помощью электронной нагрузки, которая управляется дискретным включением разрядных токов 4,5 А; 1,5 А; 0,3 А.

2.4. Специализированное программное обеспечение

Процесс испытаний автоматизирован и проводится с использованием специализированного программного обеспечения (СПО).

СПО осуществляет контроль за измерением:

- тока БХ;
- напряжения БХ;
- напряжения аккумуляторов;
- температуры по датчикам БХ.

По результатам измерений СПО производит расчет необходимых параметров, уставок и режимов в соответствии с заранее определенными алгоритмами, а также расчетных параметров перечисленных в подразделе 2.1.

В процессе работы СПО управляет коммутатором, цифровым вольтметром и ЗРУ.

3. Проведение ресурсных испытаний

Апробация методики РИ проводилась на батарее 22НКГ-4СК КА «Микрон».

Работы по РИ проведены в две стадии:

1. Разработано, подготовлено и налажено оборудование для проведения РИ; проведена метрологическая аттестация измерительных средств, входящих в состав стенда для проведения РИ; создано и отработано СПО для автоматизации РИ.

2. На втором этапе:

- определены начальные характеристики БХ с помощью входных контрольных циклов (КЦ);
- проведено циклирование БХ для различных имитируемых внешних условий;
- проведены заключительные КЦ;
- выполнен доразряд батареи на индивидуальные резисторы $R = 0,5 \text{ Ом} \pm 20\%$ до напряжения $U = 0,2 \text{ В}$ на каждом аккумуляторе для передачи батареи на хранение.

4. Результаты ресурсных испытаний

На протяжении 60 суток (879 циклов, см. рис. 3) испытаний характеристики БХ КА типа «Микроспутник» соответствовали своим паспортным значениям. Минимальное значение напряжения на БХ составляла 24,87 В, максимальное значение отданной емкости по САЧ составляла 1,58 А·ч, минимальное значение напряжения на аккумуляторах составляло 1,133 В.

На недельных циклах при пониженной и повышенной температуре испытываемая батарея также соответствовала требованиям, приведенным в Программе и методике ресурсных испытаний.

Общий срок испытаний составил 1772,17 часов.

Заключение

Предложенная методика была апробирована на СЭС КА КС5МФ2 и батарее 22НКГ-4СК на территории ХАИ на специализированном стендовом оборудовании при участии представителей ГKB «Южное».

Методика РИ БХ позволяет оценить эффективность алгоритма функционирования прибора автоматики, регулирования и контроля (ПАРК), а также его возможность ПАРК реализовывать современные способы управления БФ, контроля состояния, профилактики и восстановления характеристик БХ.

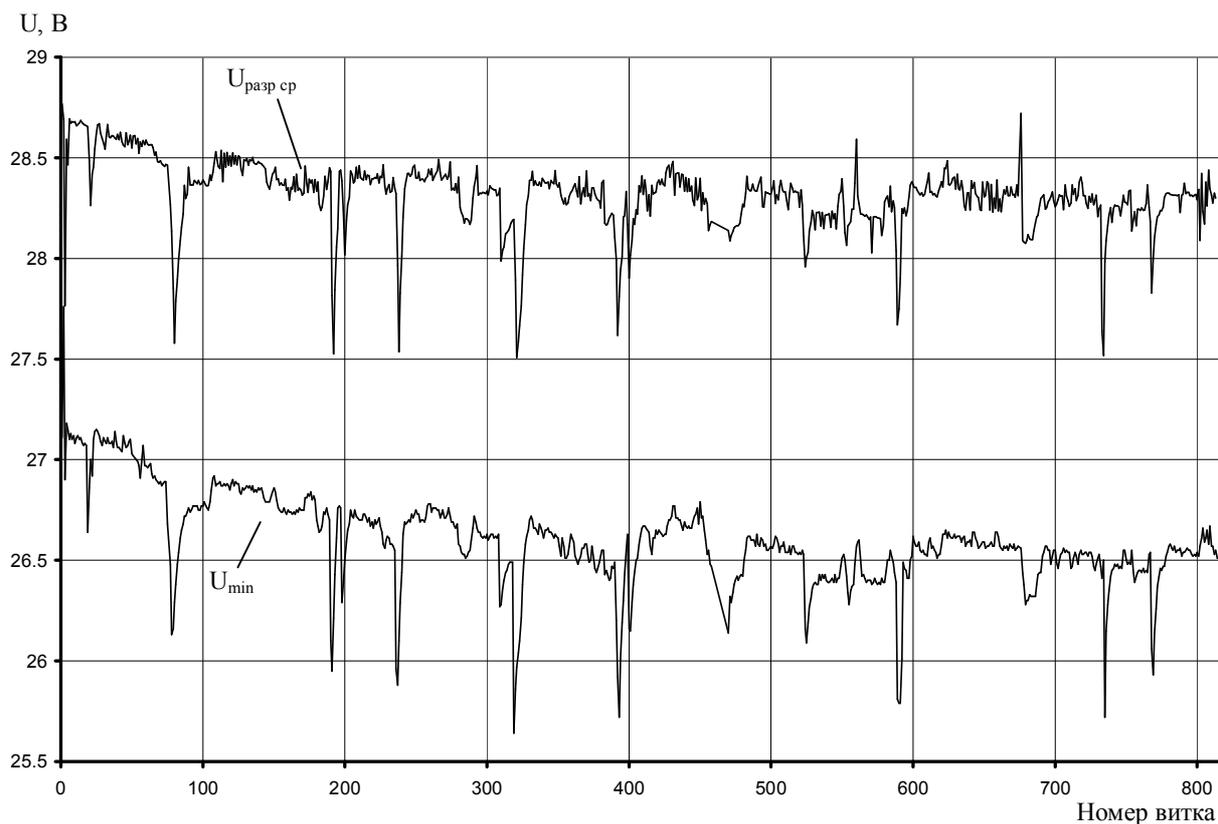


Рис. 3. Результаты РИ БХ: изменение основных энергетических характеристик (среднего и минимального разрядного напряжения) при циклировании в нормальных климатических условиях

Используя результаты РИ, проведенных по предложенной методике, возможно прогнозировать состояние БХ на всем периоде эксплуатации КА и дать рекомендации о приемлемости использования БХ данного типа на штатном КА.

Литература

1. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / 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. Жирнова Н.Б., Леонова М.В. Анализ разбега емкостных характеристик последовательно соединенных в батарею аккумуляторов на автономных объектах // Электрооборудование автономных объектов. – М.: МЭИ. – 1987. – № 143. – С. 40 – 46.
3. Определение зависимости выходных характеристик аккумуляторов от режимов их эксплуатации и определение критериев их нормальной работоспособности при эксплуатации батареи / Научн. рук. М.В. Леонова // Исп. Ф.Ф. Карпова, Ф.Ф. Таганова, Ф.Ф. Хаскина и др. – Л.: ВНИАИ, 1984. – 55 с.
4. Токарев А.Б., Жиронов Н.Б., Белов Д.Г., Перекопский И.Т. Анализ методов и устройств восстановления характеристик аккумуляторных батарей при их эксплуатации в системах электропитания // Электротехника. – 1995. – № 5. – С. 33 – 37.
5. Калайда Т.Н. Испытание химических источников электрической энергии для авиации. – Л.: ЛКВВИА им. А.Ф.Можайского, 1959. – 124 с.

Поступила в редакцию 1.06.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, ИПМаш НАН Украины, Харьков.