

УДК 629.78.064.5

Ю.А. ШЕПЕТОВ, Е.А. ДОЛЖИКОВА

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

## ОЦЕНКА РАЦИОНАЛЬНЫХ УСТАНОВЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОЛОДЕЖНОГО МИКРОСПУТНИКА

*В работе выполнена оценка рациональных установленных параметров (мощность солнечной батареи и емкость химической батареи) системы электроснабжения молодежного микроспутника. Представлена энергобалансная модель системы электроснабжения микроспутника, включающая описание зарядно-разрядной характеристики литий-ионных аккумуляторов, прогноз располагаемой емкости химической батареи, прогноз располагаемой мощности солнечной батареи. С помощью представленной модели проведены численные эксперименты и получены рациональные значения установленных параметров, а также стоимости и массы системы электроснабжения молодежного микроспутника.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, аккумуляторная батарея, математическая модель, емкость, мощность, космический аппарат, разрядная кривая.

### Введение

Под системой электроснабжения (СЭС) космического аппарата понимается совокупность устройств, обеспечивающих генерирование, накопление, распределение электроэнергии. На современных космических аппаратах (КА) системы энергообеспечения и распределения электроэнергии с учетом более высокой надежности по сравнению с другими системами занимают по массе, объему и стоимости до 30% самого КА. Поэтому проблема создания систем электропитания КА имеет первостепенное значение, ее разрешение может заметно улучшить технико-экономические показатели космического аппарата в целом [1].

Одной из главных задач этапа предварительного проектирования космического аппарата является обоснование структуры и параметров его энергетической системы, прежде всего, установленных мощности фотоэлектрических батарей (БФ) и емкости химических батарей (БХ).

В настоящее время в космической технике широко используются химические батареи на основе литий - ионных аккумуляторов в составе СЭС КА класса микроспутник с заданным ресурсом 3...5 лет. Для обеспечения нормального функционирования источников энергии системы следует обеспечить согласованный режим работы БФ как первичного источника, а также изменение напряжения на выходе БХ для более полного использования ее энергии.

Поэтому, существует инженерная задача, которая заключается в оптимальном выборе соотношения масс главных компонентов СЭС (солнечных батарей, химических батарей) с увязкой между собой минимальной массы СЭС и обеспечения максимального срока службы КА.

### Деграция химических батарей на основе литий - ионных аккумуляторов

В настоящее время широкую популярность приобретает использование литий-ионных аккумуляторных батарей. Поэтому появилась необходимость создания моделей деграции для более точного определения срока службы таких аккумуляторов.

Показатели удельной энергии для литий-ионных аккумуляторов в 2 раза лучше по сравнению с никель-водородными и в 3 раза по сравнению с никель-кадмиевыми. Кроме того, они рассеивают только около 25% тепла, а саморазряд происходит с более низкой скоростью. Именно эти особенности делают их более предпочтительными для использования в космической технике [2].

Многочисленные исследования показали, что потеря емкости литий-ионных аккумуляторов значительно зависит от длительности эксплуатации. Однако, проводить эксперименты, исчисляемые жизненный цикл в реальном времени очень долго и дорого, учитывая, что на их ход может повлиять множество различных факторов, например, глубина разряда, скорость заряда и разряда и температура. Следовательно, подобные эксперименты приходится ускорять, а по полученным данным нельзя точно оценить потери емкости [3].

На рисунке 1 показана разрядная характеристика аккумуляторной батареи Sony 18650, емкостью 1,8 А·ч на первом и пятисотом цикле. Из этого графика можно сделать вывод, что с течением времени уменьшается емкость и увеличивается перепад напряжения. Уровень заряда отрицательного электрода влияет на потерю емкости (с), а падение на-

пряжения (U) наблюдается из-за увеличения внутреннего сопротивления [4].

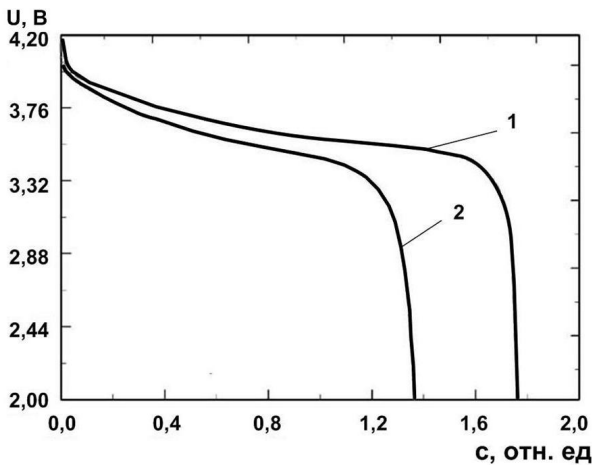


Рис. 1. Разрядная кривая аккумуляторной батареи Sony 18650 емкостью 1,8 А·ч: 1 – 1й цикл;

2 – 500й цикл

Основываясь на экспериментальных данных, можно предположить какой будет потеря мощности и разрядная кривая на любом цикле, допуская, что изменения будут аналогичны.

Сведения о назначении КА нужны для принятия решения о выборе расчетного витка, с учетом допустимости или недопустимости кратковременных ограничений на работу сеансной нагрузки в периоды максимальной длительности тени.

Для дальнейших исследований работы СЭС молодежного микроспутника была выбрана его предполагаемая солнечно-синхронная орбита высотой 600 км и наклоном 90 градусов:

- период обращения 96 мин;
- максимальная длительность теневого участка 36 мин;

А также эквивалент штатной нагрузки:

- дежурная нагрузка (W<sub>деж</sub>) – 5 Вт;
- сеансная нагрузка – 4 Вт в течение всего витка (W<sub>1</sub>), 2 Вт в течение 10 мин (W<sub>2</sub>), 5 Вт в течение 15 мин (W<sub>3</sub>).

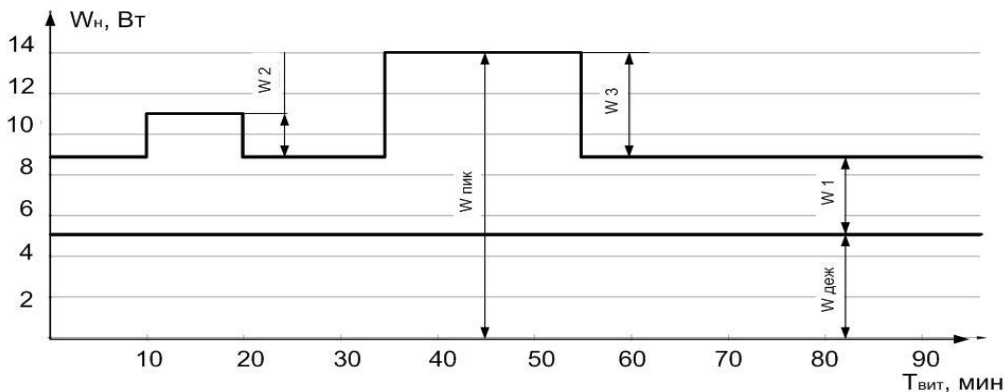


Рис. 2. График энергопотребления

График энергопотребления представлен на рис. 2.

Для решения сформулированной во введении инженерной задачи – оценки необходимых установленных параметров системы электроснабжения молодежного микроспутника – необходимо исследовать зависимость ожидаемого ресурса КА от его назначенных установленных параметров – начальной мощности БФ и начальной емкости БХ. Это целесообразно сделать с помощью математической модели СЭС, включающей модели зарядно-разрядной характеристики и располагаемой емкости БХ, а также располагаемой мощности БФ.

### Синтез математической модели химической батареи

Модуль накопления СЭС КА представляет собой сложную техническую систему, которая характеризуется большим набором различных свойств. Основным, при моделировании характеристик СЭС является описание зарядно-разрядной характеристики в зависимости от глубины разряда, тока и температуры БХ. Математическая модель (ММ) должна обеспечивать предсказание напряжения БХ (U<sub>БХ</sub>) в каждый момент времени. Однако характеристики аккумуляторов оказывают существенное влияние на характеристики БХ, таким образом, нужно учитывать поведение каждого аккумулятора в БХ как отдельного объекта, тогда,

$$U_{\text{БХ}} = \sum_{i=1}^n U_{\text{ак } i}, \quad (1)$$

где n – количество аккумуляторов в БХ;

U<sub>ак i</sub> – напряжение на i-м аккумуляторе.

Напряжение на аккумуляторе зависит от множества факторов. Прежде всего, это текущая емкость аккумулятора (его заряженность), с; ток через аккумулятор, I; температура аккумулятора, T.

Температура аккумулятора определяется как температурой окружающей среды, так и внутренними процессами тепловыделения и теплопоглощения.

ММ на основе аналитического описания зарядно-разрядных характеристик ( $U_{3,p}$ ) единичного литий-ионного аккумулятора можно представить в следующем виде:

$$U_{3,p} = ac + b \mp kdE_0 e^{-c\tau} \pm I \left( \frac{d}{1-c} + R_0 \right), \quad (2)$$

где:  $a, b$  – уточняющие коэффициенты (В);  
 $k, d$  – безразмерные коэффициенты;  
 $c$  – емкость (относительные единицы);  
 $\tau$  – срок эксплуатации;  
 $I$  – ток (А);  
 $R_0$  – сопротивление (Ом).

Задача подбора коэффициентов решена как задача оптимизации многомерной функции методом покоординатного спуска по критерию минимума среднеквадратичного отклонения (СКО) между ММ и экспериментальными данными (рис. 3). В результате СКО между ММ и экспериментальными данными составило 0,19 В (3%).

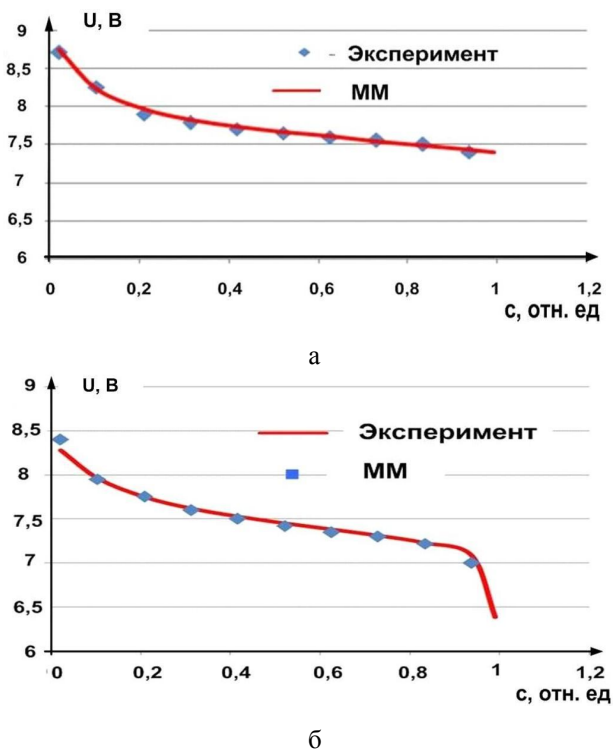


Рис. 3. Данные эксперимента и математической модели: а – зарядная кривая; б – разрядная кривая

Для описания деградации емкости БХ ( $Q_{БХ}$ ) использовалось следующее выражение:

$$Q_{БХ} = Q_0 \cdot ((1-b) \cdot e^{-a\tau} + b - c \cdot \tau), \quad (5)$$

где  $Q_0$  – начальное значение установленной емкости БХ;

$a, b, c$  – уточняющие коэффициенты;  
 $\tau$  – срок эксплуатации.

Для проверки адекватности ММ были использованы независимые экспериментальные данные

зарядно-разрядных характеристик литий-ионных аккумуляторов, которые не использовались для верификации параметров модели ( $n_1 = 20$  точек).

Для подтверждения адекватности модели на основе статистических критериев был использован критерий Фишера, который служит для проверки гипотезы о принадлежности двух выборок к одной генеральной совокупности - в данном случае пространству возможных состояний БХ, на основе сравнения количеств ожидаемых и наблюдаемых инверсий [5].

Значение критерия Фишера в данном случае составило  $F_{рас} = 1,67$ . При том, что критическое значение для данного количества инверсий  $F_{кр} = 2,94$ . Поскольку  $F_{рас} < F_{кр}$ , то можно сделать вывод, что синтезированная модель адекватно описывает зарядно-разрядную характеристику элемента.

## Результаты численных экспериментов

Главной задачей являлось получение зависимости срока службы СЭС от установленной мощности БФ и емкости БХ в относительных единицах мощности БФ и емкости БХ, а также массы БФ и БХ. В качестве переменных параметров в каждом отдельном расчете выступали мощность БФ и емкость БХ. Именно эти два параметра, в основном, определяют массоэнергетические свойства СЭС КА.

На рисунке 4 приведено изменение коэффициента обеспечения потребностей сеансной нагрузки при длительной эксплуатации КА. На конец срока эксплуатации КА приемлемое значение этого параметра должно составлять 75...80%. В качестве предельного значения коэффициента обеспечения потребности сеансной нагрузки, определяющего функциональный ресурс КА, принято 75%.



Рис. 4. Коэффициент деградации мощности БФ при длительной эксплуатации, выраженный в процентах

Функциональный ресурс, при приведенных на поле графика (рис. 5) начальных значениях установленной мощности БФ и установленной емкости БХ, ожидается приблизительно 3...3,5 года по оптимистическому и пессимистическому прогнозу ( $K_{снО}$  и  $K_{снП}$ ).

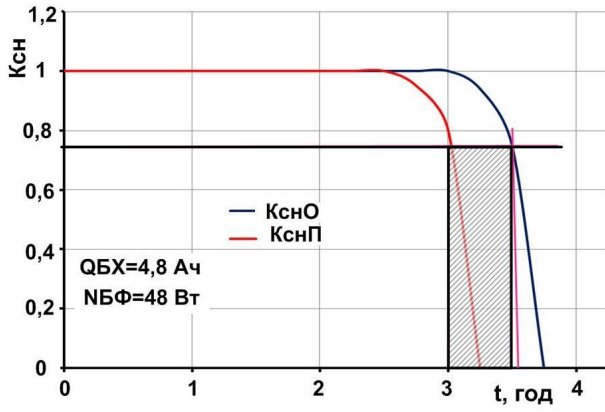
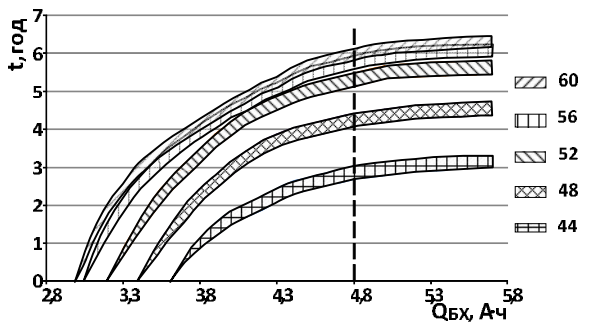
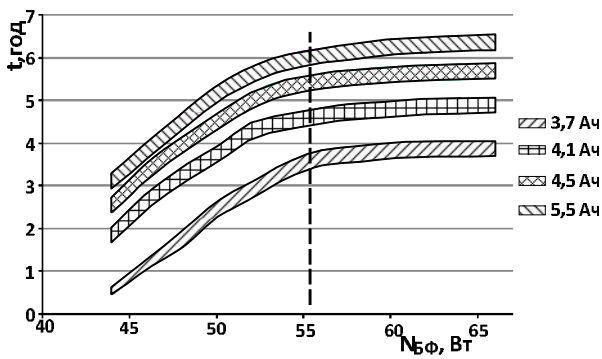


Рис. 5. Коэффициент обеспечения сеансной нагрузки

На рисунке 6 приведен расчет ожидаемого функционального ресурса КА для различных значений установленной мощности БФ и установленной емкости БХ. Значения установленных параметров варьируются в пределах 44...60 Вт, и 3,7...5,5 А·ч.



а



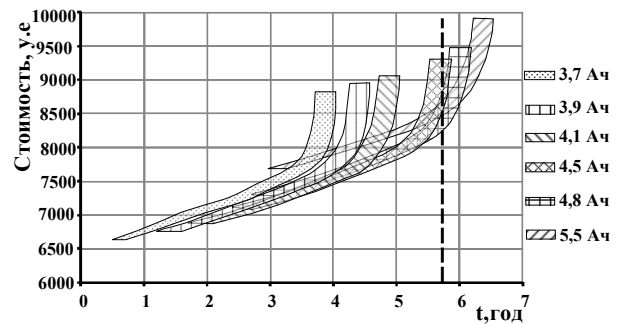
б

Рис. 6. Функциональный ресурс КА для различных значений: а – установленной мощности БФ; б – установленной емкости БХ

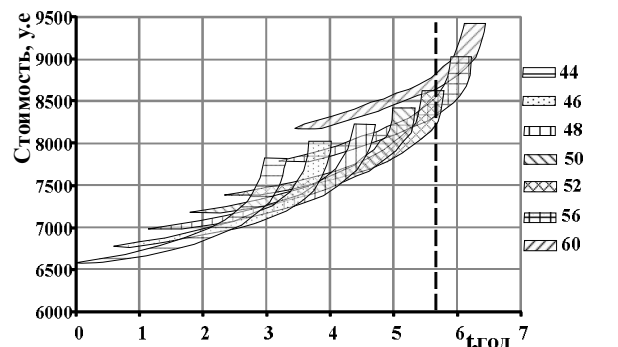
Превышение значения установленной емкости БХ выше 4,8 А·ч, практически не дает приращения функционального ресурса, также как и превышение установленной мощности БФ выше 55 Вт. Исходя из этого, именно эти значения рекомендуются как установленные параметры БФ и БХ.

С учетом текущей рыночной стоимости БХ космического назначения порядка 600 у.е./А·ч и стоимости БФ - 100 у.е./Вт оценена стоимость затрат на обеспечение различного функционального ресурса КА (рис. 7).

С учетом удельной массы существующих образцов современных БФ и литий-ионных аккумуляторов, рассчитана зависимость массы СЭС от назначенного функционального ресурса.



а



б

Рис. 7. Стоимость обеспечения необходимого функционального ресурса КА для различных значений: а – установленной мощности БФ; б – установленной емкости БХ

Полученные графики (рис. 8) повторяют предыдущие результаты и еще раз подтверждают, что рациональное значение установленной мощности БФ варьируется в пределах 52...56 Вт и рациональное значение установленной емкости БХ 4,7...4,9 А·ч.

Обобщая все эти данные (взяв огибающую кривую семейства графиков), построена зависимость относительной массы СЭС от назначенного ресурса для данного КА (рис. 9).

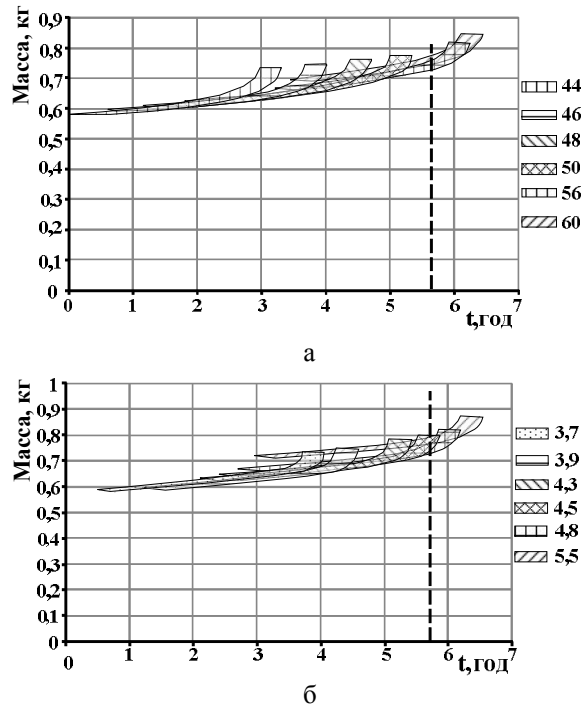


Рис. 8. Масса СЭС для обеспечения необходимого функционального ресурса КА при различных значениях: а – установленной мощности БФ; б – установленной емкости БХ

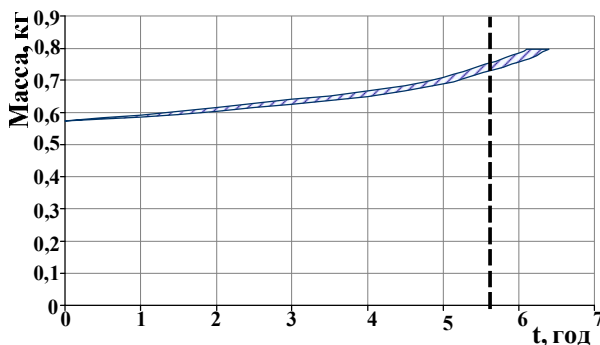


Рис. 9. Необходимая масса СЭС в зависимости от назначенного ресурса КА

### Заключение

Функциональный ресурс КА был рассчитан для различных значений установленной мощности БФ (44...60 Вт) и установленной емкости БХ (3,7...5,5 А·ч). Из полученных данных видно, что превышение значения установленной емкости БХ выше 4,8 А·ч, а установленной мощности БФ выше

55 Вт не дают приращения функционального ресурса, следовательно эти параметры являются близкими к оптимальным по ресурсу.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что функциональный ресурс КА при установленной мощности БФ равной 48 Вт и установленной емкости БХ – 4,8 А·ч, ожидается 3...3,5 года. К этому моменту ожидаемая располагаемая емкость БХ составит 45...55%.

Была рассмотрена стоимость и масса обеспечения необходимого функционального ресурса КА для различных значений установленной емкости БХ и установленной мощности БФ. Полученные графики подтверждают, что близкое к оптимальному по ресурсу значение установленной мощности БФ – 55 Вт и значение установленной емкости БХ – 4,8 Ач.

Полученная математическая модель дает возможность проанализировать изменения работы СЭС на протяжении длительного периода эксплуатации, определить функциональный ресурс КА и необходимые значения установленных параметров СЭС (емкости БХ и мощности БФ).

### Литература

1. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование [Текст]: учебн. пособие / К.В. Безручко, Н.В. Белан, Д.Г. Белов, С.В. Губин, В.И. Драновский, В.С. Кривцов, И.Т. Перекопский, И.Б. Туркин. – Х.: Гос. Аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2000. – 515 с.
2. Gang, Ning. Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates. [Text] / Ning Gang, Branko N. Popov // Journal of Power Sources. – 2003. – № 117. – P. 160-169.
3. Gang, Ning. Cycle Life Modeling of Lithium-Ion Batteries [Text] / Ning Gang, Branko N. Popov // The Electrochemical Society. – 2004. – № 151. – P. A1584-A1591.
4. Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells. [Text] / P. Ramadass, Bala Haran, R. White, Branko N. Popov // Journal of Power Sources. – 2003. – № 123. – P. 230-240.
5. Нахман, А.Д. Ряды. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / А.Д. Нахман. – Тамбов: ТГТУ, 2002. – 257 с.

Потупила в редакцию 2.12.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой физического материаловедения для электроники и гелиоэнергетики. Г. С. Хрипунов, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков

**ОЦІНКА РАЦІОНАЛЬНИХ ВСТАНОВЛЕНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МОЛОДІЖНОГО МІКРОСУПУТНИКА***Ю.О. Шепетов, К.О. Должикова*

У роботі виконана оцінка раціональних встановлених параметрів (потужність сонячної батареї і ємність хімічної батареї) системи електропостачання молодіжного мікросупутника. Надана енергобалансна модель системи електропостачання мікросупутника, що включає опис зарядно-розрядної характеристики літій-іонних акумуляторів, прогноз ємності хімічної батареї, прогноз потужності сонячної батареї. За допомогою представленої моделі проведено чисельні експерименти і отримані раціональні значення встановлених параметрів, а також вартості і маси системи електропостачання молодіжного мікросупутника.

**Ключові слова:** система електропостачання, акумуляторна батарея, математична модель, ємність БХ, потужність БФ, космічний апарат, розрядна крива.

**THE ESTIMATION OF THE POWER SUPPLY SYSTEM RATIONAL INSTALLED  
PARAMETERS OF THE STUDENT'S MICROSATELLITE***Yu.A. Shepetov, E.A. Dolzhukova*

The estimation of power supply system rational installed parameters (solar battery power and chemical battery capacity) of the student's microsatellite was done in this work. In the article energy balance model of microsatellite power supply system including a description of the charge-discharge characteristics of lithium-ion batteries, estimation of dispose chemical battery capacity and dispose solar battery power system was shown. With the help of the resulting model numerical experiments were held and rational installed parameters values, cost and weight of the power supply system of the student's microsatellite were obtained.

**Key words:** power supply system, battery, mathematical model, chemical battery capacity, solar battery power, spacecraft, discharge curve.

**Шепетов Юрий Алексеевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Должикова Екатерина Александровна** – аспирант каф. ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.