

УДК 623.1

УНИФИЦИРОВАННЫЙ РЕЗЕРВНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗВРАЩАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2019 г. Г. В. Носкин¹, Е. С. Хаванов¹, *, В. В. Савельев¹

¹Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева, Королёв, Россия
*e-mail: khavanov.egor@mail.ru

Поступила в редакцию 12.09.2019 г.

После доработки 21.10.2019 г.

Принята к публикации 23.10.2019 г.

В статье рассматривается проблема обеспечения электропитания систем возвращаемых космических аппаратов (ВКА) при двух несовместных отказах на борту ВКА и при двух отказах в системе электроснабжения (СЭС) ВКА с предложением введения в состав СЭС ВКА унифицированного (для любого ВКА) резервного накопителя электрической энергии (УРНЭЭ). С учетом целевого назначения УРНЭЭ для УРНЭЭ сформирован перечень основных требований с учетом целевого назначения ВКА и его размещения в ВКА. Проведен анализ современных электрохимических систем и с учетом перечня требований была выбрана оптимальная – литий-феррофосфатный аккумулятор. Разработана и представлена принципиальная схема УРНЭЭ для ВКА.

Ключевые слова: система электроснабжения, литий-феррофосфатный аккумулятор, возвращаемый космический аппарат, резервный накопитель электрической энергии

DOI: 10.1134/S000233101905008X

ВВЕДЕНИЕ

Система электроснабжения (СЭС) возвращаемых космических аппаратов (ВКА) предназначена для хранения электрической энергии и эффективного обеспечения ею бортовых нагрузок при спуске, посадке и послепосадочном функционировании ВКА с сохранением при заданном ресурсе высоких показателей надежности, живучести и безопасности [1–7].

Авторами, с учетом многочисленных данных, была построена штатная усредненная циклограмма бортовых нагрузок ВКА. Данные в части интервалов времени, мощностей и энергоемкостей на циклограмме 1 являются приближенными [3–7]. Данная циклограмма представлена на рис. 1. Над каждым интервалом на рис. 1 указана вероятная мощность в Вт, потребляемая аппаратурой ВКА, а в скобках указана соответствующая расчетная затрачиваемая энергоемкость в Вт ч.

Стоит отметить, что циклограмма 1 должна обеспечиваться без падения напряжения в СЭС ВКА ниже порогового значения 23–24 Вт [4].

Данное требование авторами уже освещалось в [5].

Данная циклограмма выполняется в случае отсутствия отклонения курса ВКА при спуске.

Но при двух несовместных отказах на борту ВКА, приводящих к существенному отклонению курса ВКА при спуске, его посадка с высокой степенью вероятности будет осуществлена вне запланированного квадрата.

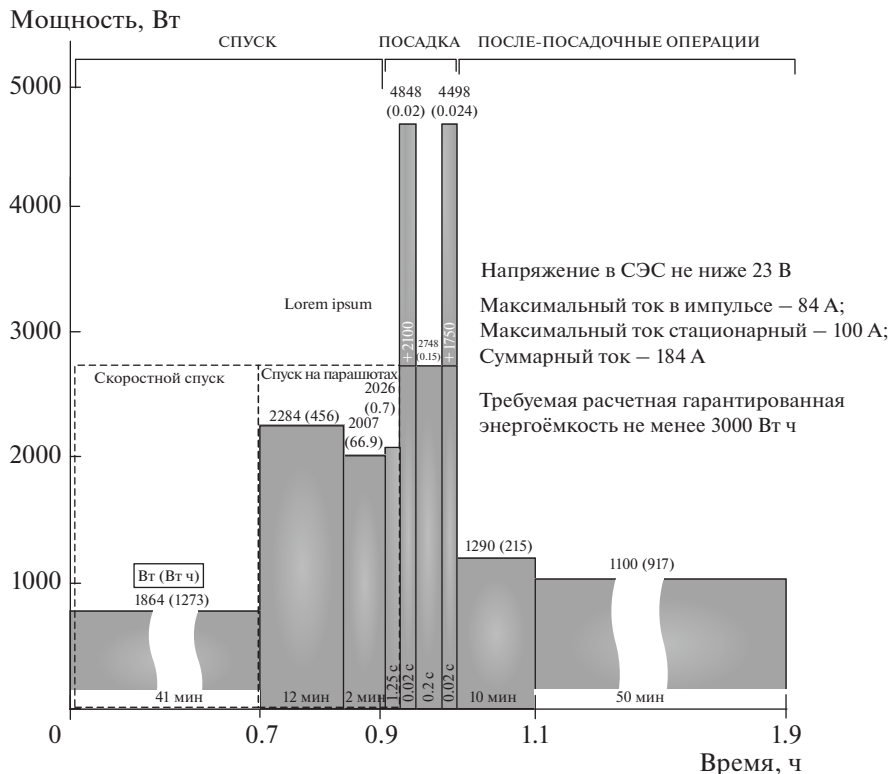


Рис. 1. Штатная усредненная циклограмма бортовых нагрузок возвращаемых космических аппаратов.

При таком варианте развития событий экипаж ВКА может оказаться на большом расстоянии от групп поиска и спасения (ГПИС) и в суровых климатических условиях [1, 2].

С помощью бортовой радиоаппаратуры (БР), входящей в состав ВКА, экипаж корабля должен осуществлять сеансы связи с ГПИС.

В целях экономии электроэнергии, разрешаются только периодические короткие сеансы связи с ГПИС в течение двух суток после посадки ВКА.

Вид циклограммы бортовых нагрузок ВКА при наличии нештатной ситуации (НШС) при двух несовместных отказах на борту ВКА представлен на рис. 2. Отличие нештатной циклограммы 2 от штатной циклограммы 1 выражается в уширении интервала послепосадочных нагрузок ВКА [3, 4].

Для обеспечения нештатной циклограммы 2 в СЭС ВКА должна быть заложена дополнительная рассчитанная авторами энергоёмкость не менее 1350 Вт ч, что предлагается осуществить с помощью введения в состав СЭС ВКА унифицированного резервного накопителя электрической энергии (УРНЭЭ) по типу “холодный резерв” (активируется по команде с пульта космонавтов или через автономный канал), допускающего установку в любой ВКА.

Введение в СЭС ВКА УРНЭЭ, по мнению авторов, положительно скажется на живучести СЭС ВКА с реализацией работоспособности СЭС ВКА при двух последовательных отказах основных накопителей электрической энергии (ОНЭЭ) в ее составе.

С учетом требования минимизации массы УРНЭЭ не предполагается реализация УРНЭЭ как третьего полноценного ОНЭЭ, но при двух отказах в СЭС, УРНЭЭ с энергоёмкостью 1350 Вт ч, согласно циклограмме 2, сможет обеспечить лишь 45% на-

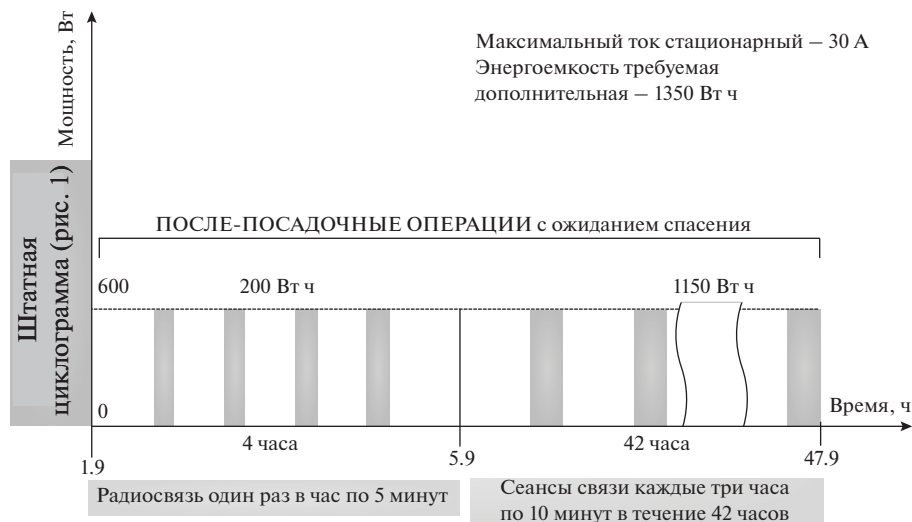


Рис. 2. Нештатная усредненная циклограмма бортовых нагрузок возвращаемых космических аппаратов.

грузки ВКА циклограммы 1 (см. рис. 1). Данное значение является недостаточным, поэтому емкость УРНЭЭ следует закладывать величиной не менее 2000 Вт ч для обеспечения спуска и посадки ВКА при двух отказах в СЭС ВКА.

Согласно вышеупомянутому можно перечислить следующие целевые назначения УРНЭЭ:

- электропитание 66.5% нагрузок ВКА по штатной циклограмме 1 при наличии двух последовательных отказов ОНЭЭ в СЭС ВКА (будет реализован спуск и посадка ВКА);
- электропитание послепосадочных нагрузок ВКА с учетом нештатной циклограммы 2 при наличии двух несовместных отказов на борту ВКА, приводящих к отклонению траектории полета ВКА.

ТРЕБОВАНИЯ К УРНЭЭ

С учетом всего вышеупомянутого авторами были сформированы требования к УРНЭЭ:

- гарантированная энергоемкость не менее 2000;
- гарантированная отдаваемая мощность не менее 2500 Вт в стационарном режиме и не менее 5000 Вт в импульсном (на рис. 1 два острых пика) при длительности импульса до 40 мс;
- минимальное напряжение в нагрузке 24 В;
- низкое тепловыделение не более 50 Вт течение 50 мин при отдаваемой мощности 2500 Вт в;
- вероятность безотказной работы не менее 0.9995;
- работоспособность при разгерметизации герметичного отсека (ГО) ВКА;
- минимизация массы;
- экологическая и пожарная безопасность использования;
- работа без стабилизатора выходного напряжения.

РАЗМЕЩЕНИЕ УРНЭЭ В ВКА

Размещение УРНЭЭ в негерметичных отсеках (НГО) ВКА авторами принято нецелесообразным, так как приводит к следующим проблемам:

Таблица 1. Анализ современных перспективных ЭХС для УРНЭЭ

Характеристика	Тип ЭХС				
	LiCoO Литий-кобаль- тат (катод)	Li(MCA) Смесевой катод	LiFePO Литий-ферро- фосфат (катод)	LiTiO Литий-ти- танат (анод)	Li-pol полимерный электролит
Удельная энергоемкость, Вт ч/кг	До 150	До 180	До 130	До 90	До 130
Максимальный стационарный ток разряда, С (А)	До 5 С	До 5 С	До 5 С	До 10 С	До 5 С
Пожаробезопасность при мех. повреждении или перегреве	Нет	Нет	Да	Да	Нет
Размещение в ГО ВКА (Да/Нет)	Нет	Нет	Да	Да	Нет
Рабочая температура, °С	-10...+50	-10...+50	-30...+55	-40...+50	-20...+50
Саморазряд, % в месяц	До 2%	2%	3–5%	2–5%	5%
Окончательный выбор ЭХС был сделан из ЭХС, имеющих свойства пожаробезопасности при механическом повреждении или перегреве, что является ключевым требованием к УРНЭЭ для ВКА.					
Примечательные особенности LiFePO	Стабильное напряжение разряда, высокие токи разряда				
Примечательные особенности LiTiO	Высокая скорость заряда, высокие токи разряда, работоспособность при больших низких температурах (ЭХС LiTiO близка по свойствам к суперконденсаторам)				

– перекомпоновка приборов и агрегатов НГО каждого ВКА с разработкой и введением дополнительных силовых конструкций в НГО для крепления УРНЭЭ, что снимает букву “У” с аббревиатуры – “УРНЭЭ”;

– ужесточение требований к УРНЭЭ в части герметичности.

УРНЭЭ предполагается размещать в герметичном отсеке (ГО) ВКА, так как это позволит снизить требования к герметичности УРНЭЭ до минимума относительно требований к аппаратуре, размещаемой в НГО. Крепление УРНЭЭ в ГО может быть обеспечено без доработок силовой конструкции ГО с применением ремennого типа крепежа, успешно используемого при доставке грузов средствами современных ВКА как на международную космическую станцию (МКС), так и с нее [3–7].

ВЫБОР ЭХС УРНЭЭ

При выборе электрохимической системы (ЭХС) для УРНЭЭ были проанализированы параметры перспективных современных ЭХС.

В табл. 1 представлены обобщенные данные проведенного анализа [8–12].

С учетом требований к УРНЭЭ, был выбран наиболее оптимальный вариант ЭХС, со следующими электрическими параметрами ячейки:

- удельная плотность энергии: до 130 Вт ч/кг;
- число циклов заряд/разряд до потери 20% емкости: 2000–7000;
- срок хранения: до 15 лет;
- саморазряд при комнатной температуре: 2% в месяц;
- напряжение максимальное в элементе: 3.65 В (полный заряд);
- напряжение минимальное: 2 В (полный разряд);
- напряжение рабочее: 3.0–3.3 В;
- минимальное рабочее напряжение разряда: 2.8 В;
- удельная мощность: >6.6 Вт/г (при экстремальном разряде током 60 С);
- диапазон рабочих температур: от –30°С до +55°С.

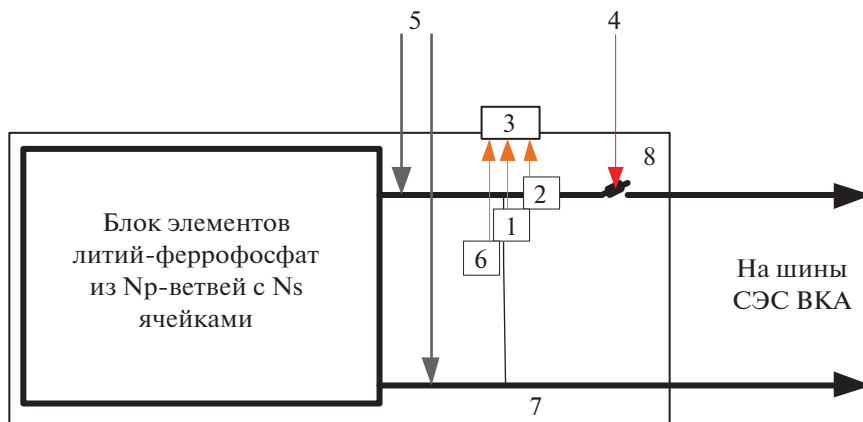


Рис. 3. Принципиальная схема унифицированного резервного накопителя электрической энергии (УРНЭЭ) для возвращаемого космического аппарата. 1 – датчик напряжения блока элементов ЛФФ; 2 – датчик тока на силовой шине “7”; 3 – индикатор телеметрический (напряжение, ток, температура, показатель заряда, показатель разряда УРНЭЭ); 4 – команда подключения УРНЭЭ к шинам СЭС ВКА; 5 – шины заряда УРНЭЭ током от 1 до 10 А; 6 – датчик температуры; 7 – силовые шины УРНЭЭ; Ns – количество последовательно соединенных ЛФФ ячеек в ветви; Np – количество параллельно-соединенных ветвей; 8 – корпус УРНЭЭ.

Вышеупомянутые параметры принадлежат литий-ферро-фосфатной (ЛФФ) ЭХС (LiFePO_4). ЛФФ ячейка была выбрана в качестве основы УРНЭЭ благодаря своим следующим положительным особенностям [8, 10]:

- высокая экологическая и пожарная безопасность (даже при механическом сквозном повреждении);
- стабильное напряжение разряда. Напряжение на выходе остается близко к 3.2 В во время разряда, пока заряд аккумулятора не будет исчерпан полностью, что позволяет отказаться от дополнительных устройств стабилизации напряжения;
- имеет более высокий пиковый ток (а, учитывая стабильность напряжения и пиковую мощность), чем у, к примеру, LiCoO_2 ;
- имеет большую удельную плотность энергии, чем у литий-титаната, из-за более высокого потенциала ячейки;
- термическая и химическая стабильность, что также существенно повышает безопасность батареи [8–12].

Такая ЭХС является оптимальной для космического использования и именно по такой ЭХС и предлагается разработать УРНЭЭ для ВКА.

РАЗРАБОТКА УРНЭЭ НА ОСНОВЕ ЯЧЕЕК LiFePO_4 . ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА

Разрабатывать УРНЭЭ предполагается по разработанной с учетом основных требований к нему принципиальной схеме, представленной на рис. 3.

ВЫВОДЫ

Была проведена работа, в итоге которой получены:

- оценка нагрузки бортовых систем современных возвращаемых космических аппаратов (ВКА);
- по результатам оценки построены два варианта обобщенных циклограмм бортовых нагрузок ВКА (штатная и нештатная);

- составлен и представлен перечень основных требований к унифицированному резервному накопителю электрической энергии (УРНЭЭ) ВКА;
- проработан вопрос оптимального размещения УРНЭЭ в ВКА;
- проведен анализ современных перспективных электро-химических систем (ЭХС), согласно которому, с учетом всех требований к УРНЭЭ, была обосновано выбрана ЭХС на основе литий-феррофосфатных (ЛФФ) ячеек;
- разработана схема УРНЭЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. Новосибирск: ВО “Наука”. Сибирская издательская фирма, 1994. 318 с. [250–308].
2. Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов”. Лесной вестник, 2019. № 4(19). С. 20–33.
3. Черток Б.Е., Николаев В.Д., Носкин Г.В., Пацора А.И. Развитие мировой космической деятельности. Орбитальные группировки космических аппаратов. Проблемы энергоснабжения. Сборник тезисов докладов конференции представителей авиационной промышленности, Москва, ОАО “Аэроэлектромаш”, 2004. С. 235–240.
4. Зернов А.С., Кузьминов В.В., Николаев В.Д. Системы электропитания космических аппаратов (Развитие и результаты эксплуатации). Автономная энергетика: технический прогресс и экономика, 2009. № 26. С. 21–26.
5. Хаванов Е.С. Разработка системы электроснабжения возвращаемого космического аппарата на базе одноразовой батареи и суперконденсаторов. В книге: Гагаринские чтения – 2018 Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодежной научной конференции. 2018. С. 325.
6. Грузков С.А., Останин С.Ю., Сугробов А.Н., Токарев А.Б., Тыричев П.А. Электрооборудование летательных аппаратов. Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. МЭИ, 2005. 568 с. [510–554].
7. Николаев В.Д., Зернов А.С. Обеспечение безопасности химических автономных источников питания аппаратуры и бортового оборудования российского сегмента Международной космической станции. Космическая техника и технологии. 2019. № 1(24). С. 35–49.
8. Профатилова И.А., Тарнопольский В.А. Проблемы безопасности литий-ионных аккумуляторов. Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. 2009. № 26. С. 52–53;
9. Кулова Т.Л., Николаев И.И., Фатеев В.Н., Алиев А.Ш. Современные электрохимические системы аккумулирования энергии. *Kimia problemleri*, 2018. № 1(18).
10. Источники тока/Литий железо фосфатные аккумуляторы/ [Электронный ресурс]. URL: <https://istochnikipitaniy.ru/akkumulyatory/batarei/lifepo4.html/> (дата обращения: 23.08.2019).
11. Батраков Ю.А., Туманов Б.И., Алашкин В.М., Ромадин В.Ф. Литий ионная батарея с феррофосфатным катодом: Патент РФ № 2373614. URL: <https://findpatent.ru/patent/237/2373614.html>.
12. Литий-полимерные (Li-Polymer) аккумуляторы / [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mt-system.ru/catalog/litij-polimernye-li-polymer-akkumuljatory/> (дата обращения: 27.08.2019).

Unified Reserve Electric Power Storage for Power Supply Systems of Returning Spacecrafts

G. V. Noskin^a, E. S. Khavanov^{a, *}, and V. V. Savelyev^a

^a *Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia), Korolev, Russia*

*e-mail: khavanov.egor@mail.ru

The article considers the problem of providing power to the onboard systems of returned spacecraft (RS) in case of two incompatible failures on board the RS and in case of two failures in the power supply system (PSS) of the RS. Proposed to enter the of a unified standby electric power storage (USEEPS) in the PSS RS. Taking into account the purpose of USEEPS, for this device, a list of basic requirements is was formed taking into account the purpose of the RS and its placement in the RS. The analysis of modern electrochemical systems was carried out and, taking into account the list of requirements, the optimal lithium ferrophosphate accumulator was chosen. The basic scheme of the USEEPS has developed and presented.

Keywords: power supply system, lithium ferrophosphate accumulator, returned spacecraft, unified standby electric power storage