

УДК 629.78.001.5

## ГИБРИДНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Надараина Ц.Г.<sup>1\*</sup>, Селиванов А.И.<sup>1\*</sup>, Шестаков И.Я.<sup>2\*\*</sup>,  
Фадеев А.А.<sup>2\*\*\*</sup>, Виноградов К.Н.<sup>2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> «Конструирование, внедрение образцов новой техники»,  
КВОНТ, Свободный пр., 75, Красноярск, 660041, Россия

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий  
им. академика М.Ф. Решетнева,  
СибГУ, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет,  
Свободный пр., 79, Красноярск, 660041, Россия

\* e-mail: svoi\_2010@list.ru

\*\* e-mail: yakovlevish@mail.ru

\*\*\* e-mail: fadeev.77@mail.ru

\*\*\*\* e-mail: VInogradov-KN@yandex.ru

---

Система генерирования электроэнергии — одна из важнейших бортовых систем космических аппаратов с позиции энергообеспечения и надежности. Выход из строя этой системы влечет за собой выход из строя всего аппарата. Для повышения энерговооруженности космических аппаратов в качестве возможного варианта предложен гибридный накопитель энергии. Данное устройство позволит поддерживать необходимое электропитание бортовой аппаратуры и компенсировать пиковое потребление энергии на борту. В его состав включены химический и кинетический накопители, а также ионисторы. Ионисторы предназначены для компенсации быстрых переходных процессов в различных электрических схемах. Описан принцип работы данной установки в режиме накопления энергии и в режиме отдачи ее в систему потребителей.

*Ключевые слова:* литий-ионный аккумулятор, накопитель энергии, перспективный космический аппарат, система электропитания, маховик, энерговооруженность, ионистор.

---

### Введение

Для развития космической техники требуется значительное увеличение энерговооруженности космических аппаратов (КА), обеспечивающих связь, навигацию, телевидение, предоставление интернет-услуг, а также КА, применяемых в изучении и освоении дальнего космоса.

В системах энергоснабжения КА применяются следующие основные типы энергетических установок [1—10]:

— комбинация солнечных батарей и химических источников тока;

— установки на основе топливных и термоэмиссионных элементов;

- установки, использующие в своем составе накопители (маховики, сжатые газы, энергия пружин);
- установки на основе электродинамических тросовых систем;
- установки на основе ядерной энергии (радиоактивные изотопы и реакторы деления).

Широко распространена схема из комбинации солнечных и аккумуляторных батарей, взаимодействующих через энергопреобразующий комплекс [4, 5, 9]. Солнечные (СБ) и аккумуляторные батареи (АБ) применяются достаточно давно, тем не менее изучение особенностей их функционирования и разработка математических моделей остаются актуальными проблемами и сегодня.

Система электропитания (СЭП) — одна из важнейших бортовых систем космических аппаратов. Конструкция и характеристики системы во многом определяют конструктивный облик, срок активного существования спутника на орбите, его функциональные возможности, надежность, массогабаритные и экономические показатели. Масса бортовой системы электропитания отечественных спутников составляет до 25% от массы, объема и до 30% стоимости космического аппарата. Выход из строя данной системы влечет за собой выход из строя всего аппарата [1, 4, 5, 9].

Выбор энергоустановки зависит от потребляемой мощности на борту и времени службы аппарата [3]. Главное требование к СЭП — непрерывность работы и повышение энергоэффективности. От ресурса СЭП зависит срок активного существования КА.

Необходимость решения этих вопросов с целью совершенствования системы электропитания КА обуславливает актуальность настоящей работы.

**Целью** работы является повышение энергетической эффективности системы электропитания космических аппаратов за счет рационального вы-

бора основных элементов комбинированной энергоустановки.

На рис. 1 представлена типовая система энергопитания КА. Система создается с помощью блока аккумуляторных батарей 3, подключенного через релейно-контакторный аппарат (или комплекс энергопреобразующий) 2 и соответствующую кабельную систему к солнечной батарее 1.

Так как поступление энергии от солнечной батареи не является непрерывным и по мере захода космического аппарата в тень Земли и выхода из нее процесс подзарядки то возникает, то исчезает, в СЭП установлен специальный автомат, исключающий возможность перезарядки батареи и тем самым вывода ее из строя или недозарядки, при которой можно лишиться необходимого количества энергии. Для космического аппарата система автомата зарядки и разрядки рассчитана на движение спутника по орбите с периодическим чередованием теневых и солнечных участков [1, 2].

### Накопители электроэнергии

Важное место при решении задач энергосбережения, обеспечения необходимого качества и эффективного преобразования энергии для потребителей на борту КА занимают накопители энергии. Накопители энергии запасают энергию, получаемую из системы электроснабжения, хранят ее и выдают по мере необходимости обратно в энергосистему. Поэтому накопители энергии являются важным промежуточным звеном между генераторами и системами распределения и потребления электроэнергии.

Существующие накопители различаются [11]:

- по характеру протекания физических, химических и других процессов,
- по принципу действия,
- по конструктивному исполнению,
- по технологии изготовления.

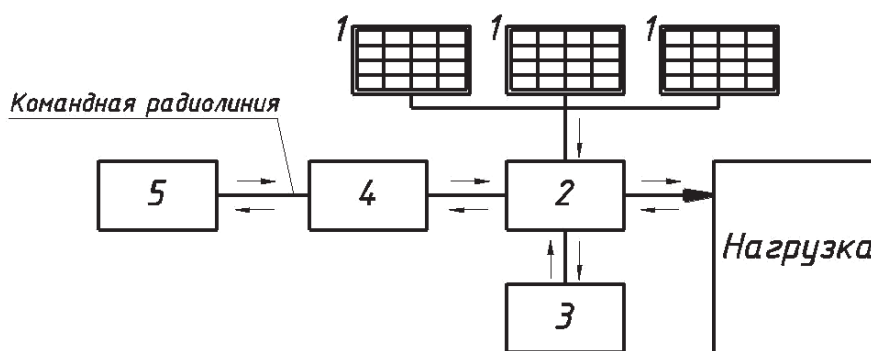


Рис. 1. Принципиальная схема электропитания КА: 1 — генератор (солнечная батарея); 2 — комплекс энергопреобразующий; 3 — блок аккумуляторных батарей; 4 — бортовой комплекс управления; 5 — наземный комплекс управления

Основными параметрами, определяющими рациональный выбор накопителя, являются:

- циклограмма нагрузки,
- удельная энергия по массе и объему,
- удельная мощность (скорость заряда или разряда),
- ресурс работы,
- надежность.

**Гибридный накопитель энергии**

Технические достижения, особенно в области высокопрочных материалов, бесконтактных опор и литий-полимерных (литий-ионных) аккумуляторных батарей, создали предпосылки для разработки гибридного накопителя электроэнергии [12, 13]. Для повышения энерговооруженности КА авторами [14] предложено устройство, включающее в себя химический и кинетический накопители энергии. Для улучшения массогабаритных характеристик необходимы высокие скорости вращения накопителя, что обеспечивается применением высокопрочных материалов, а схемы статических преобразователей должны исключать низкочастотные трансформаторы. Корпус маховика исключает осколочное разрушение за счет применения полимерных

композиционных материалов на основе высокопрочных органонитей. Разрушение таких маховиков сопровождается распушением нитей.

Гибридный накопитель (рис. 2) устанавливается в составе системы электропитания спутника взамен блока аккумуляторных батарей, что позволит поддерживать необходимое электропитание бортовой аппаратуры во время нерасчетных режимов работы КА для поддержания его живучести, снятия телеметрии и выдачи команд радиоуправления в случаях возможных аварийных ситуаций генератора электроэнергии. Для компенсации возникающего кинетического момента используются два накопителя, работающие в противофазе.

Первичный запуск установки после вывода КА на расчетную орбиту от неподвижного состояния до номинального режима осуществляется с помощью ионисторов [15]. В процессе работы ионистора не происходит химических превращений веществ (при соблюдении режимов зарядных напряжений), поэтому ресурс системы может превышать 100 000 циклов заряда разряда. Целесообразно их использование в гибридных схемах с аккумуляторами. В этом случае ионистор реагирует на короткие пики генерации или потребления электроэнергии, увели-

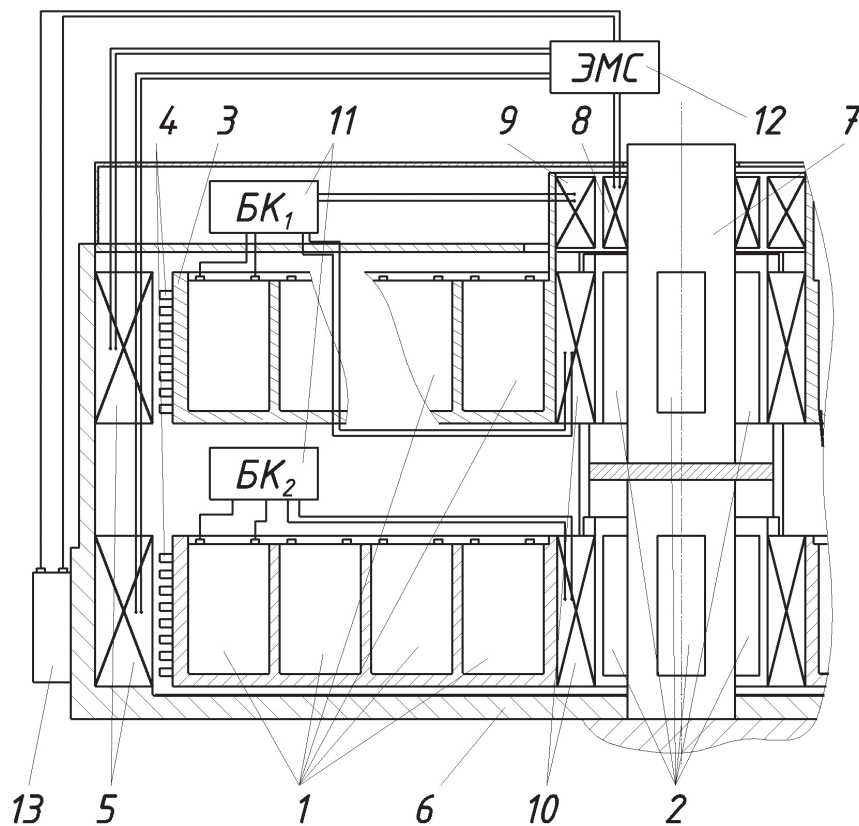


Рис. 2. Гибридный накопитель энергии: 1 — блок АБ; 2 — постоянные магниты бесколлекторного генератора; 3 — корпус маховика; 4 — магнитные кольца гистерезисного двигателя ВД1, ВД2; 5 — статорные обмотки гистерезисного двигателя ВД1, ВД2; 6 — основание установки; 7 — ось; 8 — вторичные обмотки трансформатора; 9 — первичные обмотки трансформатора; 10 — статорные обмотки бесколлекторного генератора; 11 — блок коммутации; 12 — электромеханическая система; 13 — ионисторы

чивая ресурс аккумулятора и снижая время отклика всей системы на внешние воздействия. Солнечные батареи при этом развернуты и готовы к работе, совместно с аккумуляторами питают полезную нагрузку.

Ионисторы работают в буфере с аккумуляторными батареями в целях защиты их от резких скачков тока нагрузки. При низком токе нагрузки батарея подзаряжает ионисторы, а в случае резкого возрастания тока ёмкостные накопители отдадут запасенную энергию, чем уменьшат нагрузку на батарею.

Конструктивно гибридный накопитель разделяется на подвижную и неподвижную части. Неподвижная часть установки состоит из двух обмоток 5 гистерезисных двигателей ВД<sub>1</sub>, ВД<sub>2</sub>, электромеханической системы 12 и магнитов 2 ротора бесколлекторного генератора. Подвижная часть состоит из корпуса маховика 3, на котором установлены литий-ионные аккумуляторные батареи, блок коммутации 11 и магнитные кольца 4 гистерезисного двигателя ВД<sub>1</sub>, ВД<sub>2</sub> [16].

Маховик 3 с аккумуляторными батареями раскручивается до рабочей частоты вращения  $n_2$ . На данном этапе происходит накопление кинетической энергии.

Работа гибридного накопителя в процессе отдачи энергии происходит с изменением скорости вращения, что ведет к необходимости решения проблемы получения на выходе переменного тока стабильной частоты. Это решается непосредственно с помощью электромашинных устройств или специального инвертора.

Во время работы комбинированного накопителя энергия заряженных аккумуляторных батарей 1 через блок коммутации 11, первичные обмотки 9 и вторичные обмотки 8 подается в электромеханическую систему 12. По мере расходования энергии

аккумуляторных батарей происходит их подзарядка от статорных обмоток 10 через блок коммутации 11. При этом работает бесколлекторный генератор за счет наведения ЭДС в статорных обмотках 10 при вращении их вокруг постоянных магнитов 2, расположенных на оси 7. В результате кинетическая энергия вращающихся масс преобразуется в электрическую энергию. Накопленная кинетическая энергия посредством преобразования с помощью бесколлекторного генератора в электрическую возвращается через блок коммутации 11, первичные обмотки 9 и вторичные обмотки 8 в электромеханическую систему 12. По мере расходования кинетической энергии частота вращения маховика 3 снижается до критического числа оборотов  $n_1$ . При большом токе нагрузки ионисторы 13 отдают запасенную электроэнергию в электромеханическую систему 12, что позволяет уменьшить нагрузку на аккумуляторную батарею 1.

Согласно предварительным расчетам в работе [17] показано, что совместное применение АБ и маховика позволит улучшить массогабаритные характеристики составных элементов СЭП КА в пределах 24%.

В таблице представлены характерные показатели накопителей энергии [11, 17–19].

Из таблицы следует, что наилучшими удельными параметрами обладают химические и механические накопители, а также ионисторы [20]. Ионистор — энергонакопительное устройство с двойным электрическим слоем. Двойной электрический слой образуется поверхностью электрода и соприкасающимися с ним ионами электролита и может рассматриваться как конденсатор с очень малым (порядка  $10^{-8}$  м) расстоянием между обкладками, а следовательно, высокой емкостью, достигающей 100–500 Ф на 1 г веса электродов при напряжении 0,7–3 В, или около 20 мкФ/см<sup>2</sup> в водных раство-

Сравнение накопителей по удельной энергии

Накопитель		Удельная энергия, Вт·ч/кг	Время полного разряда, с
Статическая активная зона	Химический	36...360	1...10 <sup>5</sup>
	Индуктивный	0,36...3,6	10 <sup>3</sup> ...10
	Ёмкостный	0,036...0,18	10 <sup>-6</sup> ...10 <sup>-2</sup>
	Ионисторы	4...10	1...60
Динамическая активная зона	Механический	3,6...360	1...10 <sup>3</sup>
	Электромеханический	0,36...3,6	10 <sup>-2</sup> ...10
	Электродинамический	0,018...0,36	10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-2</sup>
Комбинированная зона	Гибридный накопитель энергии	44,6...446,4	1...10 <sup>5</sup>

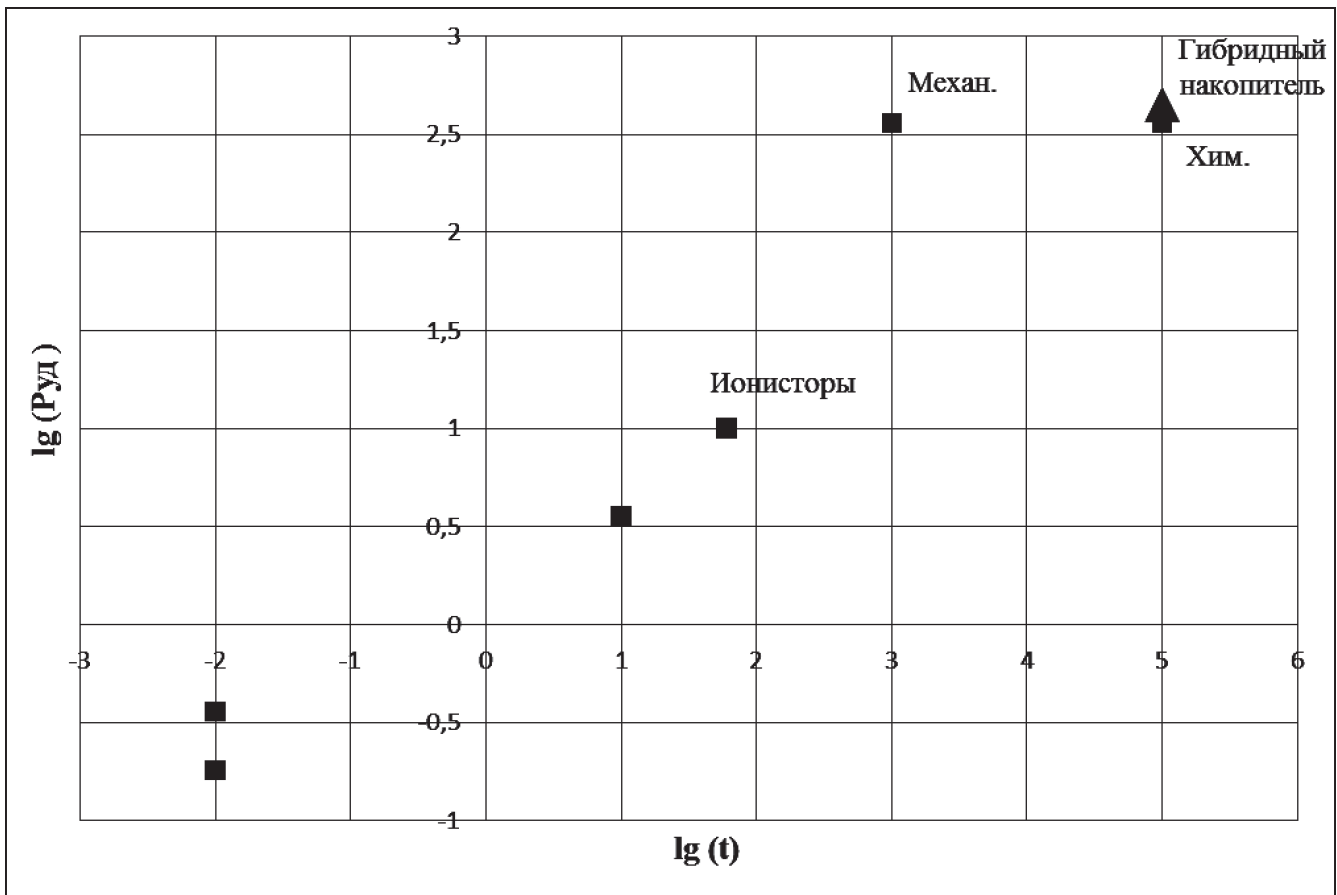


Рис. 3. Множество Эджворта—Парето

рах [21]. Ионисторы предназначены для компенсации быстрых переходных процессов в различных электрических схемах. К недостаткам ионисторов следует отнести недостаточное накопление энергии и небольшую энергетическую плотность.

Логарифмируя данные таблицы, построим множество Эджворта—Парето для различных типов накопителей энергии (рис. 3). Из рисунка видно, что имеется положительное направление вправо и вверх, т.е. чем дальше вправо и вверх будет располагаться накопитель, тем он будет энергоэффективнее. В представленном множестве доминирующим является гибридный накопитель.

Предлагаемая установка имеет более широкие функциональные возможности по сравнению с отдельно взятыми ионисторами, маховиком и аккумуляторной батареей. Магнитные кольца гистерезисного двигателя и статорные обмотки бесколлекторного генератора вращаются вместе с маховиком, что вносит вклад в накопление кинетической энергии. Сглаживание пиковых нагрузок на аккумуляторные батареи посредством ионисторов и отсутствие щёточно-контактного аппарата увеличивает срок эксплуатации гибридного накопителя энергии.

**Выводы**

1. Для удовлетворения возрастающих требований к системам электропитания перспективных космических аппаратов необходима реализация некоторых возможных технических решений:

- повышение гарантированных удельных характеристик элементов СЭП в конце срока активного существования КА;
- переход на элементы нового типа;
- снижение уровня деградации солнечных батарей;
- создание адаптивных систем преобразования электроэнергии, управления СЭП и контроля ее работы для обеспечения наиболее эффективного использования возможностей элементов данной системы;
- повышение ресурса и стойкости СЭП при воздействии факторов космического пространства.

2. Рациональный выбор основных элементов системы электропитания для решения конкретных задач позволяет оптимизировать технические, массогабаритные и стоимостные характеристики космического аппарата в целом.

3. Повышение энергоэффективности достигается применением специального схемного построения

ния, основанного на современной компонентной базе, что определяет ресурс работы. Применение бесконтактных магнитных высокотемпературных сверхпроводниковых подвесов в маховике позволяет существенно уменьшить механические потери и, при использовании установки в безвоздушном пространстве, увеличить время хранения запасённой кинетической энергии.

4. Результаты теоретического моделирования гибридного накопителя показали увеличение энергомассового совершенства СЭП.

#### Библиографические ссылки

1. *Чеботарев В.Е., Косенко В.Е.* Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. — Красноярск: СибГАУ, 2011. — 488 с.
2. *Белан Н.В., Безручко К.В., Елисеев В.Б., Ковалевский В.В., Летин В.А., Постаногов В.П., Федоровский А.Н.* Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей: Учеб. пособие. — Харьков: ХАИ, 1992. Ч. 1 — 191 с.
3. *Квасников Л.А., Латышев Л.А., Пономарев-Степной Н.Н., Севрук Д.Д., Тихонов В.Б.* Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Изд-во МАИ, 2001. — 480 с.
4. *Худяков С.А.* Космические энергоустановки. — М.: Знание, 1984. — 64 с.
5. *Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н.* Системы электропитания космических аппаратов. — Новосибирск: Наука, 1994. — 316 с.
6. *Нариманов Е.А.* Космические солнечные электростанции. — М.: Знание, 1991. — 63 с.
7. *Скребушевский Б.С.* Космические энергетические установки с преобразованием солнечной батареи. — М.: Машиностроение, 1992. — 224 с.
8. *Лукьяненко М.В., Лукьяненко М.М., Ловчиков А.Н., Базилевский А.Б.* Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов: Монография. — Красноярск: СибГАУ, 2008. — 174 с.
9. *Шинброт С., Когги Дж.* Объединенная энергетическая система для пилотируемого космического корабля / Пер. с англ. под ред. А.А. Куландина, С.В. Тимашева // Вопросы космической энергетики. — М.: Мир, 1971. С. 36-58.
10. *Марахтанов М.К., Пильников А.В.* О возможности применения солнечной электрореактивной двигательной установки на низкоорбитальных малых космических аппаратах // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 26-39.
11. *Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В.* Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 400 с.
12. *Нижниковский Е.А.* Химические источники автономного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 228 с.
13. *Васич П.С., Дежин Д.С., Ковалёв Л.К., Ковалёв К.Л., Полтавец В.Н.* Сверхпроводниковая электрическая машина с постоянными магнитами и массивными высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 2. С. 65-76.
14. *Надараиа Ц.Г., Шестаков И.Я., Фадеев А.А., Виноградов К.Н., Надараиа К.В., Селиванов А.И.* Комбинированный накопитель энергии. Патент RU 2637489 С1. Бюл. № 34, 05.12.2017.
15. *Вышков Ю.Д., Резников С.Б.* Применение суперконденсаторов в системах пуска авиационных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 127-133.
16. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники: Учебник. — Изд. 2-е, испр. и доп. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 664 с.
17. *Надараиа Ц.Г., Шестаков И.Я., Фадеев А.А., Виноградов К.Н., Михалев Д.Н.* Повышение энергетической эффективности системы электропитания перспективных космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2016. Т. 17. № 4. С. 983-988.
18. *Vivekchand S.R.C., Rout Sekhar Chandra, Subrahmanyam K. S., Govindaraj A., Rao C. N. R.* Graphene-based electrochemical supercapacitors // Journal of Chemical Sciences. 2008. Vol. 120. No 1, pp. 9-13.
19. *Коровин Н.В., Скундин А.М.* Химические источники тока: Справочник. — М.: Изд-во МЭИ, 2003. — 740 с.
20. *Бибиков С.Б., Мальцев А.А., Кошелев Б.В., Зудов К.А., Кудров М.А.* Перспективные накопители энергии типа суперконденсаторов: принципы работы и применение в авиации и космической технике // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 185-194.
21. Суперконденсаторы, <http://eef.misis.ru/sites/default/files/lectures/3-4+Тема+6.+Суперконденсаторы.pdf>

## HYBRID ENERGY STORAGE DEVICE IN POWER SUPPLY SYSTEM FOR PROSPECTIVE SPACECRAFT

**Nadaraia Ts.G.<sup>1\*</sup>, Selivanov A.I.<sup>1\*</sup>, Shestakov I.Ya.<sup>2\*\*</sup>,  
Fadeev A.A.<sup>2\*\*\*</sup>, Vinogradov K.N.<sup>3\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> "Design, implementation of new equipment",  
75, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660041, Russia

<sup>2</sup> Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev,  
31, Krasnoyarsky Rabochy newspaper av., Krasnoyarsk, 660037, Russia

<sup>3</sup> Siberian Federal University,  
79, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660041, Russia

\* e-mail: svoy\_2010@list.ru

\*\* e-mail: yakovlevish@mail.ru

\*\*\* e-mail: fadeev.77@mail.ru

\*\*\*\* e-mail: VInogradov-KN@yandex.ru

### Abstract

The article presents the improved version of spacecraft power supply system by rational selection of the hybrid power plant basic elements. Power supply system is the most important onboard system from the viewpoint of energy supply and reliability. Failure of this system entails failure of the whole spacecraft.

The main types of power plants, such as a combination of solar and chemical batteries, installations based on various physical phenomena, and electrodynamic tether systems, as well as nuclear ones are known.

Rational selection of the power-plant basic elements to solve specific problems allows improve technical, mass-and-size and cost characteristics of a spacecraft in total.

The improvement of the power supply system energy efficiency is achieved by special schematic architecture and joint application of chemical and kinetic energy storage devices. The hybrid energy storage device will allow maintain the required energy supply of the onboard equipment and compensate peak energy consumption onboard a spacecraft. This energy storage device includes ionistors. Ionistors serve to compensate fast transients while the installation start-up in orbit. Compensation of the occurring kinetic moment is realized by installing two energy storage devices operating in antiphase. Application of contactless, magnetic, high-temperature super-semiconductor suspension in the flywheel allows significantly reduce mechanical losses and increase the storage time of the stored kinetic energy.

The principle of the above said installation operation in both energy storing mode and energy return to the system to consumers' mode is described. The hybrid energy storage device operation in the process of energy

return takes place with rotation speed changing, which leads to the necessity of solving the problem of obtaining the AC of stable frequency at the output. This problem is being solved directly by rotating converter or a specialized inverter. Smoothing the peak loads on the battery by ionistors and the lack of brush gear increase the lifespan of the hybrid energy storage device.

Indicative computations show that application of the hybrid energy storage device allow improve mass-and-size characteristics of the power supply system by 24%. The suggested approach will be employed in further activities associated with enhancing the energy-mass perfection of the spacecraft power supply system.

**Keywords:** rechargeable lithium-ion battery, energy storage device, prospective spacecraft, power supply system, flywheel, power-to-weight ratio, ionistor.

### References

1. Chebotarev V.E., Kosenko V.E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* (Fundamentals of spacecraft for dataware design), Krasnoyarsk, SibGAU, 2011, 488 p.
2. Belan N.V., Bezruchko K.V., Eliseev V.B., Kovalevskii V.V., Letin V.A., Postanogov V.P., Fedorovskii A.N. *Bortovye energosistemy kosmicheskikh apparatov na osnove solnechnykh i khimicheskikh batarei* (Spacecraft onboard power systems based on solar and chemical batteries), Kharkov, KhAI, 1992. Part 1 – 191 p.
3. Kvasnikov L.A., Latyshev L.A., Ponomarev-Stepnoi N.N., Sevruk D.D., Tikhonov V.B. *Teoriya i raschet energosilovykh ustanovok kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (Spacecraft power-plants theory and design), Moscow, MAI, 2001, 480 p.
4. Khudyakov S.A. *Kosmicheskie energoustanovki* (Space power-plants), Moscow, Znanie, 1984, 64 p.
5. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov*

- (Spacecraft power supply systems), Novosibirsk, Nauka, 1994, 316 p.
6. Narimanov E.A. *Kosmicheskie solnechnye elektrostantsii* (Space solar electric power-plants), Moscow, Znanie, 1991, 63 p.
  7. Skrebushevskii B.S. *Kosmicheskie energeticheskie ustanovki s preobrazovaniem solnechnoi batarei* (Space power-plant with solar cell conversion), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 224 p.
  8. Luk'yanenko M.V., Luk'yanenko M.M., Lovchikov A.N., Bazilevskii A.B. *Istochniki energii sistem elektrosnabzheniya kosmicheskikh apparatov* (Energy sources of spacecraft power supply systems), Krasnoyarsk, SibGAU, 2008, 174 p.
  9. Shinbrot S., Koggi Dzh. *Voprosy kosmicheskoi energetiki*, Moscow, Mir, 1971, pp. 36-58.
  10. Marakhtanov M.K., Pil'nikov A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 26–39.
  11. But D.A., Alievskii B.L., Mizyurin S.R., Vasyukevich P.V. *Nakopiteli energii* (Energy storages), Moscow, Energoatomizdat, 1991, 400 p.
  12. Nizhnikovskii E.A. *Khimicheskie istochniki avtonomnogo elektropitaniya radioelektronnoi apparatury* (Chemical self-contained power supplies for radio electronic equipment), Moscow, MEI, 2004, 228 p.
  13. Vasich P.S., Dezhin D.S., Kovalev L.K., Kovalev K.L., Poltavets V.N. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 65-76.
  14. Nadaraia Ts.G., Shestakov I.Ya., Fadeev A.A., Vinogradov K.N., Nadaraia K.V., Selivanov A.I. *Patent RU 2637489 C1*, 05.12.2017.
  15. Vyshkov Yu.D., Reznikov S.B. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 127–133.
  16. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki* (Fundamentals of power electronics), Novosibirsk, NGTU, 2003, 664 p.
  17. Nadaraia Ts.G., Shestakov I.Ya., Fadeev A.A., Vinogradov K.N., Mikhalev D.N. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 983–988.
  18. Vivekchand S.R.C., Rout Sekhar Chandra, Subrahmanyam K. S., Govindaraj A., Rao C.N.R. Graphene-based electrochemical supercapacitors. *Journal of Chemical Sciences*, 2008, vol. 120, no. 1, pp. 9–13.
  19. Korovin N.V., Skundin A.M. *Khimicheskie istochniki toka* (Chemical current sources), Moscow, MEI, 2003, 740 p.
  20. Bibikov S.B., Mal'tsev A.A., Koshelev B. V., Zudov K.A., Kudrov M.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 185–194.
  21. *Superkondensatory* (Super Capacitors), <http://eef.misis.ru/sites/default/files/lectures/3-4+Tema+6.+Superkondensatory.pdf>