

УДК 629.78.064.5

К.В. БЕЗРУЧКО<sup>1</sup>, В.Н. БОРЦОВ<sup>2</sup>, А.О. ДАВИДОВ<sup>1</sup>, Н.В. ЗАМИРЕЦ<sup>2</sup>,  
 О.Н. ЗАМИРЕЦ<sup>2</sup>, А.М. ЛИСТРАТЕНКО<sup>2</sup>, И.Т. ПЕРЕКОПСКИЙ<sup>3</sup>,  
 И.Б. ТУРКИН<sup>1</sup>, Ю.А. ШОВКОПЛЯС<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

<sup>2</sup> *Государственное предприятие «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», Харьков, Украина*

<sup>3</sup> *Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина*

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*В статье проведен анализ современных мировых достижений в области создания систем электроснабжения современных космических аппаратов, рассмотрены принципы построения высокоэффективных и надежных систем электроснабжения космических аппаратов и приведена концепция их создания. Также показаны перспективы развития систем электроснабжения космических аппаратов. Актуальность работы обусловлена тем, что в Украине и в мире спутникостроение развивается очень высокими темпами. В статье приведена концепция разработки современных систем электроснабжения, перспективы их совершенствования, необходимость обеспечения максимального замкнутого цикла производства космической техники при ограниченном материальном и финансовом обеспечении.*

**Ключевые слова:** *система электроснабжения, космический аппарат, фотоэлектрическая батарея, химическая батарея.*

### Введение

Современная космическая технология является одним из немногих направлений, которые определяют стратегическое место государства в мире [1]. Изучение и освоение космоса требуют развития и совершенствования космических аппаратов (КА) разного назначения. При этом наибольшее практическое значение приобретают автоматические непилотируемые КА для формирования систем связи, телевидения, навигации и геодезии, наблюдения и передачи информации, изучения погодных условий и природных ресурсов Земли, исследования далекого космоса и т.д. [2, 3]. Создание КА для решения этих задач требует энергетического обеспечения достаточно жестко заданных функций – как целевой, так и вспомогательных: по точности ориентации, коррекции параметров орбиты, обеспечению теплового режима.

На современных КА системы снабжения и распределения электроэнергии с учетом более высоких требований к их надежности по сравнению с другими системами занимают по массе, объему и стоимости до 30% самого КА. Практика применения современных спутников подтверждает зависимость успеха всей миссии КА от работоспособности системы электроснабжения (СЭС).

Высокие показатели технико-экономической эффективности разрабатываемых СЭС обеспечиваются разработкой и использованием новых прогрессивных технологий при создании материалов и комплекующих, стойких к воздействию неблагоприятных факторов космической среды, применением современных средств диагностирования и управления, экспериментальной проверкой и подтверждением надежности предложенных технических и технологических решений путем проведения наземных испытаний в условиях, максимально приближенных к натурным.

Проблема создания высокоэффективных, надежных СЭС КА имеет первостепенное значение, ее разрешение может заметно улучшить технико-экономические показатели КА в целом, а комплекс направлений ее решения невозможно воплотить в жизнь без соответствующих организационно-методических, научных и технологических мероприятий.

### 1. Анализ современных мировых достижений в создании систем электроснабжения космических аппаратов

Обеспечение электрической энергией бортовой аппаратуры автоматических КА – комплексная за-

дача, включающая генерацию, накопление, стабилизацию и распределение электроэнергии [4].

Для нормального функционирования системы следует обеспечить согласованный режим работы источников и потребителей электроэнергии, а также обеспечить в нагрузочном оборудовании необходимое напряжение с минимальными пульсациями. Функцию согласования источников и потребителей осуществляют дискретные регуляторы или полупроводниковые преобразовательные устройства.

## 2. Принципы построения высокоэффективных и надежных систем электроснабжения космических аппаратов

К настоящему времени разработано большое количество СЭС фотоэлектрического типа, различающихся уровнем мощности, ресурсом работы, принципами построения, структурой, выходными характеристиками, конструктивным исполнением [2, 5, 7].

Разнообразие задач, решаемых с использованием КА, предопределяет разнообразие и специфику требований к СЭС, основными среди которых являются:

- уровень выходной мощности;
- ресурс работы на орбите;
- высокая надежность и безопасность;
- приемлемый вес, габариты и стоимость;

- стойкость к длительному воздействию факторов космического пространства;
- экологическая чистота.

В настоящее время в качестве первичного источника электроэнергии на околоземных КА, как правило, используются фотоэлектрические батареи (БФ). Это обусловлено более приемлемыми параметрами и эксплуатационными свойствами БФ, а именно: экологическая чистота, значительный ресурс работы на орбите, высокая надежность, масштабируемость к необходимым уровням мощности и возможным затратам.

На рис. 1 приведены основные направления исследований и разработок в области первичных источников электроэнергии.

В качестве вторичного источника электроэнергии, необходимого для электропитания КА в случаях, когда мощность БФ отсутствует или ее недостаточно, в подавляющем большинстве случаев используются аккумуляторные химические батареи (БХ).

Современные БХ способны выдержать сотни и даже тысячи циклов заряда–разряда, что позволяет эксплуатировать их в течение десятков лет без замены. Высокая плотность энергии, длительный ресурс и надежность являются основными требованиями, определяющими выбор и применение БХ различных электрохимических систем в СЭС КА (рис. 2). Наряду с определяющими требованиями важны хорошая отработанность и опыт практического применения.



Рис. 1. Основные направления исследований и разработок в области первичных источников электроэнергии



Рис. 2. Типы электрохимических накопителей энергии, используемые в космонавтике



Рис. 3. Ключевые факторы и условия разработки СЭС КА

### 3. Концепция создания высокоэффективных и надежных систем электроснабжения

В течение последних лет в разработке находилась спектр СЭС КА, среди которых выделим различающиеся уровнем выходной мощности – от нескольких ватт до единиц киловатт, исполнением – герметичным и негерметичным, орбитами – солнечно-синхронной и геостационарной. Исходя из этого выделены ключевые факторы и условия разработки СЭС КА (рис. 3).

Таким образом, существует научно-техническая проблема создания современных и конкурентоспособных СЭС различного назначения в условиях нарушенных связей предприятий кооперации космической отрасли бывшего СССР, необходимости обеспечить максимальный замкнутый цикл производства космической техники в Украине, недостаточного материального обеспечения. Решение данной проблемы требует комплексного развития материаловедения и технологии производства, численных методов анализа и поиска оптимальных проектных решений, теории и практики испытаний, развития производственной и стендовой базы, информатизации всех этапов жизненного цикла.

Для испытаний и отработки СЭС и их элементов создан многоцелевой испытательный комплекс [4, 6].

Основная концепция созданного научно-технического комплекса (НТК) основана на создании и применении совокупности многоцелевых научных стендов, составными частями которых являются на-

турные агрегаты, имитаторы, масштабные физические модели и математические модели, что в сочетании с единой универсальной автоматизированной информационно-управляющей системой позволяет:

- обеспечить требуемый уровень достоверности испытаний и информативности научных исследований;
- снизить материальные и временные затраты, необходимые для их проведения.

На протяжении 1995–2011 гг. научно-технический комплекс использовался для решения различных задач, перечисленных на рис. 4.

### 4. Перспективы развития систем электроснабжения космических аппаратов

Согласно концепции Общегосударственной целевой научно-технической космической программы Украины на 2013 – 2017 годы целеустремленная и последовательная космическая деятельность является ключевым фактором высокотехнологического развития государства, повышения конкурентоспособности его экономики, сохранения суверенитета и роста международного имиджа [1, 8].

Проблема, на решение которой направлена Программа, заключается в значительной диспропорции между уровнем имеющегося потенциала космической отрасли страны и реальным влиянием космической деятельности на решение актуальных общегосударственных и общественных заданий.

Некоторые задачи космической программы Украины по развитию систем электроснабжения перспективных КА приведены на рис. 5.



Рис. 4. Задачи, решенные с помощью научно-технического комплекса СЭС



Рис. 5. Основные направления космической программы относительно систем электроснабжения КА

Приобретенный опыт проектирования низковольтных СЭС (27...40 В), безусловно, может быть применен и к высоковольтным.

Однако практика показывает невозможность механического использования большинства наработанных ранее технических решений, поскольку возникает ряд проблем, вызванных повышением напряжения солнечной и аккумуляторной батарей.

Повышение напряжения БХ за счет увеличения количества аккумуляторов в последовательной цепочке приводит к снижению ее надежности и ресурса работы. Для обеспечения длительной эксплуатации такой БХ требуются более сложные алгоритмы управления ее работой, предусматривающие углубленный контроль состояния аккумуляторов и специальные режимы для восстановления характеристик.

### Заключение

Реорганизация отечественной кооперации предприятий и организация отрасли, целью которой было максимальное обеспечение замкнутого цикла изготовления ракетно-космических изделий в Украине, привели к необходимости решать комплекс научных, проектных, технологических задач в области солнечной космической энергетики.

До практической реализации доведена концепция создания СЭС КА с принципиально новыми проектными решениями, к которым относятся дискретное регулирование выходной мощности первичного источника электроэнергии (БФ) и оперативное выравнивание степени заряженности аккумуляторов в составе накопителя энергии – аккумуляторной батареи, что в целом обеспечивает эффективность использования и высокую надежность СЭС в течение длительного времени эксплуатации. Для обоснования и проверки этой концепции проведена экспериментальная отработка СЭС.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований и испытаний, которые доказали практическую реализуемость новых схемных решений, а также позволили экспериментально исследовать свойства и технические характеристики перспективных технических решений.

Одним из направлений усовершенствования технических характеристик бортовых систем автоматических космических аппаратов (КА) является разработка принципов и способов построения высокоэффективных СЭС с повышенным до 100 В выходным напряжением.

Впервые применен комплексный подход к получению математической модели СЭС КА и отдель-

ных агрегатов. Созданы новые оригинальные методы анализа данных и идентификации математических моделей источников и накопителей энергии СЭС КА. Качественно новые результаты достигнуты путем комплексного применения традиционных методов и новых подходов современных направлений статистического анализа, теории идентификации, искусственного интеллекта.

Разработаны ММ и ПО для расчета освещенности, температуры и энергетических характеристик БФ с учетом влияния факторов космического пространства для разных схем ориентации БФ с учетом стохастической природы начальных значений и деградации параметров БФ в натуральных условиях.

Созданы методика и технические средства для проверки функционирования БФ на основе контроля световых и темновых характеристик, что способствует повышению достоверности контроля за счет введения температурной коррекции, переменного шага измерений, учета нелинейности вольт-амперной характеристики БФ.

Выполнены оптимизационные расчеты конструкции ФП, технологического процесса их производства, пространственного размещения БФ на КА разной конфигурации, параметров электрических схем БФ, что в совокупности обеспечивает максимум энергетической эффективности БФ в течение всего полета КА. Результаты расчетов реализованы в конструкторских и технологических решениях, подтвержденных впоследствии во время натурального эксперимента с экспериментальными БФ на орбите и в процессе летных испытаний.

Впервые в Украине во время разработки и изготовления БФ космического назначения для КА EgyptSat-1 и платформы украинского микроспутника МС-2-8 были использованы однопереходные арсенидгаллиевые ФП на гетероструктуре с КПД ~ 19...20 %, стойкие к радиационным, термоциклическим и энергозарядным факторам, а также с длительным сроком эксплуатации в условиях космического полета.

Создан уникальный комплекс экспериментальных технических средств, который обеспечивает исследование основных видов взаимодействий между агрегатами СЭС и позволяет повысить информативность и качество испытаний в условиях имеющихся ограничений на стоимость и трудоемкость. Характеристика НТК совпадает с мировыми аналогами стендовой базы моделирования и испытаний энергоустановок КА, а в Украине и среди стран СНГ такая стендовая база является уникальной, о чем свидетельствуют многочисленные работы, проведенные с помощью этого НТК по заказу разных предприятий как Украины, так и России.

Разработана оригинальная методика оценивания надежности СЭС, которая в отличие от имею-

щихся подходов и методов комплексно учитывает разные механизмы внезапных отказов и деградации составляющей части системы.

В процессе имитационного моделирования работы батареи Li-Ion-аккумуляторов в составе СЭС КА исследовано влияние разброса характеристик аккумуляторов, а также изучены разные методы парирования внештатных ситуаций. На основе анализа результатов моделирования сформулирована и решена задача формирования логики работы СЭС, получены количественные характеристики режимов работы составных частей СЭС.

Впервые создана информационная технология автоматизации испытаний СЭС КА, которая основывается на использовании специализированного языка для описания процессов испытаний, что обеспечивает снижение трудоемкости испытаний и экономии ресурса объекта испытаний.

Сформулированы перспективные направления развития систем электроснабжения КА.

## Литература

1. Горбулін, В.П. Збереження статусу ракетно-космічної держави – національне завдання України [Текст] / В.П. Горбулін, А. І. Шевцов // *Стратегічні пріоритети*. – 2008. – № 1 (16). – С. 144 – 152.
2. Коротеев, А.С. Космическая энергетика сегодня и завтра [Текст] / А.С. Коротеев, Е.М. Кошелев, А.И. Ремшин // *Известия РАН. Энергетика*. – 2001. – № 5. – С. 3 – 16.
3. Космические летательные аппараты. Назначение, структура и основные этапы создания. [Текст] / Ю.Ф. Даниев, А.В. Демченко, В.С. Зевако [и др.]. – Днепропетровск: Системные технологии. – 2005. – 123 с.
4. Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей [Текст]: учеб. пособ. / К.В. Безручко, В.Б. Елисеев, В.П. Постаногов [и др.]. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – Ч. 1. – 260 с.
5. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро "Южное" [Текст] / Под общ. ред. С.Н. Конохова. – Д.: ООО "КолорГраф", ООО РА "Тандем-У", 2001. – 240 с.
6. Концепция разработки унифицированных платформ микроспутников и их модификаций [Текст] / Д.Г. Белов, В.С. Гладилин, В.И. Драновский, С.С. Кавелин // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2002. – № 1 (26). – С. 120 – 123.
7. Методы отработки научных и народнохозяйственных ракетно-космических комплексов [Текст] / В.Ф. Грибанов, А.И. Рембеза, А.И. Голиков [и др.]; под общ. ред. В.Ф. Грибанова. – М.: Машиностроение, 1995. – 352 с.
8. Недайвода, А.К. Технологические основы обеспечения качества ракетно-космической техники [Текст] / А.К. Недайвода. – М.: Машиностроение, 1998. – 240 с.

Поступила в редакцію 2.09.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., В.Н. Доценко, проф. каф. теоретической механики и машиноведения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ, ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

*К.В. Безручко, В.М. Борщов, А.О. Давідов, М.В. Замирець, О.М. Замирець, О.М. Листратенко, І.Т. Перекопський, І.Б. Туркін, Ю.А. Шовкопляс*

У статті проведений аналіз сучасних світових досягнень в області створення систем електрозабезпечення сучасних космічних апаратів, розглянуті принципи побудови вискоефективних та надійних систем електрозабезпечення космічних апаратів й приведена концепція їх створення. Також зазначені перспективи розвитку систем електрозабезпечення космічних апаратів. Актуальність роботи обумовлена тим, що в Україні та у світі супутникобудування розвивається високими темпами. У статті приведена концепція розробки сучасних систем електрозабезпечення, перспективи їх удосконалення, необхідність забезпечення максимального замкнутого циклу виробництва космічної техніки при обмеженому матеріальному й фінансовому забезпеченні.

**Ключові слова:** система електрозабезпечення, космічний апарат, фотоелектрична батарея, хімічна батарея.

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT, MANUFACTURING AND MAINTENANCE OF SYSTEMS OF THE ELECTRICAL SUPPLY OF SPACE VEHICLES

*K.V. Bezruchko, V.N. Borshchov, A.O. Davidov, N.V. Zamirec, O.N. Zamirec, A.M. Listratenko, I.T. Perekopsky, I.B. Turkin, Y.A. Shovkoplyas*

In paper the analysis of modern world achievements in the field of creation of electrical supply systems of modern space vehicles is carried out, principles of construction of highly effective and reliable of electrical supply systems of space vehicles are observed and the concept of their creation is resulted. Also prospects of development of systems of an electrical supply of space vehicles are shown. The work urgency is caused by that in Ukraine and in the world the satellite generation develops very high rates. In paper the concept of modern electrical supply systems development, a prospect of their improvement, necessity to provide of the maximum closed cycle of manufacture of space techniques with the restricted material and financial resources are shown.

**Key words:** electrical supply systems, space vehicles, photovoltaic array, chemical battery.

**Безручко Константин Васильевич** – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Борщов Вячеслав Николаевич** – д-р техн. наук, проф., заместитель генерального директора по научной работе Государственного предприятия «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», Харьков, Украина.

**Давидов Альберт Оганезович** – канд. техн. наук, докторант Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Замирець Николай Васильевич** – д-р техн. наук, проф., генеральный директор – главный конструктор Государственного предприятия «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», Харьков, Украина.

**Замирець Олег Николаевич** – канд. техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе Государственного предприятия «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», Харьков, Украина.

**Листратенко Александр Михайлович** – канд. техн. наук, начальник научно-производственного отдела разработки микроэлектронных узлов Государственного предприятия «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», Харьков, Украина.

**Перекопський Іван Терентьевич** – начальник сектора специализированной научно-исследовательской лаборатории КБ-3 Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

**Туркін Ігорь Борисович** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры инженерии программного обеспечения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Шовкопляс Юрий Анатольевич** – заместитель Главного конструктора КБ-3 Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.