

В. В. ГАСАНОВА, студент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

Ю. Г. КАТОРГИНА, аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

Я. А. СТОЛЯРОВ, аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

Е. Г. ЧЕЧИНА, студент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

АНАЛИЗ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ДОЛГО ЖИВУЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Проведен анализ типов аккумуляторов, используемых в энергоустановках космических аппаратов. Сформулированы рекомендации касательно выбора электрохимической системы для космических аппаратов сроком службы более 10 лет. Проведен расчет стоимости системы энергоснабжения с использованием различных типов аккумуляторов. Показано, что наиболее оптимальным, с точки зрения стоимости запуска, типом аккумуляторов являются электрохимические системы на основе лития.

Ключевые слова: система энергоснабжения, аккумулятор, аккумуляторная батарея, космический аппарат, орбита.

Введение. Данная статья посвящена анализу и выбору электрохимических накопителей энергии для энергоустановок космических аппаратов.

В настоящее время невозможно представить жизнь современного человека без участия разнообразных космических аппаратов:

- цифровое спутниковое телевидение (Бадр-2, Бонум, Апстар, Тор-6, Интелсат 20 и др.);
- цифровое спутниковое радиовещание (Афрестар и др.);
- телефонная связь (Бадр-2, Иридиум 97, Апстар, Тор-6, Интелсат 20 и др.);
- навигационные системы (Компас М4, Navstar, Глонасс 746 и др.);

© В. В. Гасанова, Ю. Г. Каторгина, Я. А. Столяров, Е. Г. Чечина, 2014

- дистанционное зондирование и исследование поверхности Земли (Криосат-2, Канопус-В и др.);

- военные спутники (АЕНФ, DSCS и др.).

- навигационные системы (Компас М4, Navstar, Глонасс 746 и др.);

- дистанционное зондирование и исследование поверхности Земли (Криосат-2, Канопус-В и др.);

- военные спутники (АЕНФ, DSCS и др.).

Большинство современных космических аппаратов, которые работают на высоких и геостационарных орбитах, имеют проектный ресурс от 10 до 18 лет (см. рис. 1).

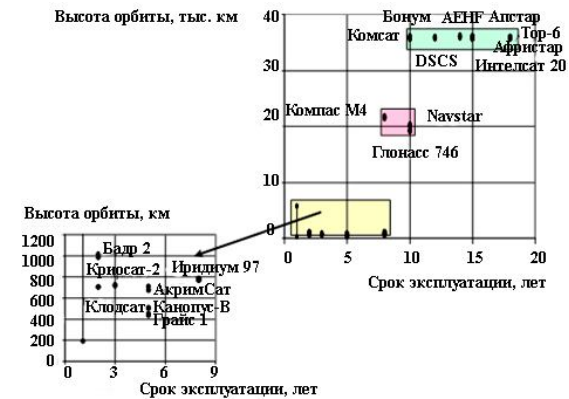


Рис. 1 - Ресурс различных космических аппаратов.

Система энергоснабжения космического аппарата предназначена для выработки, хранения, регулирования и распределения электроэнергии во всех фазах работы космического аппарата на орбите.

Система энергоснабжения космического аппарата состоит из следующих элементов:

- источники энергии;
- накопители энергии;
- преобразователи энергии;
- система управления и контроля.

Выход из строя системы энергоснабжения ведет к отказу всего космического аппарата. На данный момент, одним из наиболее критичных элементов энергоустановок космических аппаратов, с

точки зрения ресурса, являются накопители энергии, а именно аккумуляторные батареи. В зависимости от условий работы космического аппарата к электрохимическим аккумуляторам, входящим в состав энергоустановок, выдвигаются различные требования: возможность обеспечения большего количества циклов заряда-разряда, возможность обеспечения длительной сохранности энергии и т.п. Исходя из требований к аккумуляторам по количеству циклов и ресурсу в составе энергоустановок космических аппаратов применяются 3 типа электрохимических аккумуляторов: никель-кадмиевые; никель-водородные и литий-ионные.

Постановка задачи. Обзор источников информации [1-3, 6, 8-10] показал, что выполнение современных задач, решаемых космическими аппаратами, требует их длительной эксплуатации.

В зависимости от характеристик орбиты, на которой работает космический аппарат, электрохимические аккумуляторы, входящие в состав энергоустановок, работают в разных условиях: так при эксплуатации космических аппаратов на низких орбитах электрохимический аккумулятор за время эксплуатации подвергается значительно большему количеству циклов заряда-разряда (см. рис. 2, 3 и 4), чем при эксплуатации космических аппаратов на высоких орбитах.

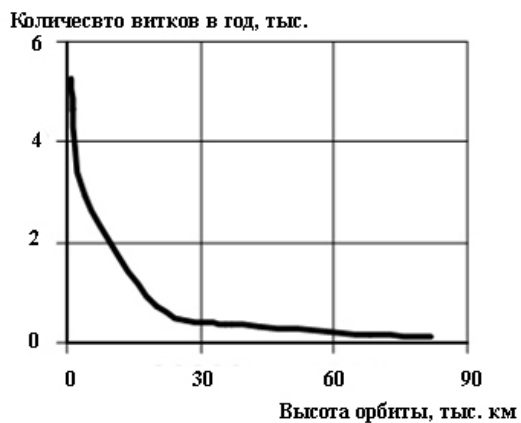


Рис. 2 - Изменение количества витков космического аппарата в год в зависимости от высоты орбиты.

В связи с тем, что аккумуляторные батареи являются составляющей частью энергоустановок основной массы ракетно-

космических объектов и в значительной степени влияют на их работоспособность и ресурс, вопрос о применении наиболее оптимального типа электрохимической системы является довольно актуальным.

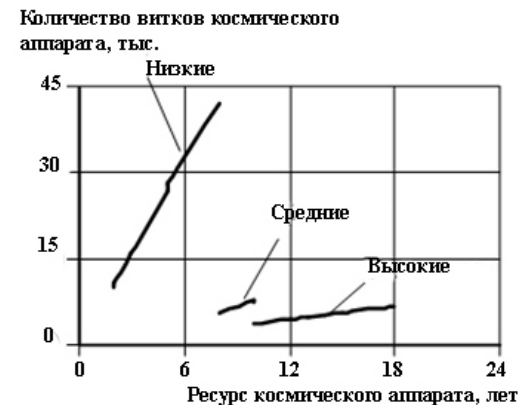


Рис. 3 - Изменение количества витков космического аппарата в зависимости от его ресурса и высоты орбиты.

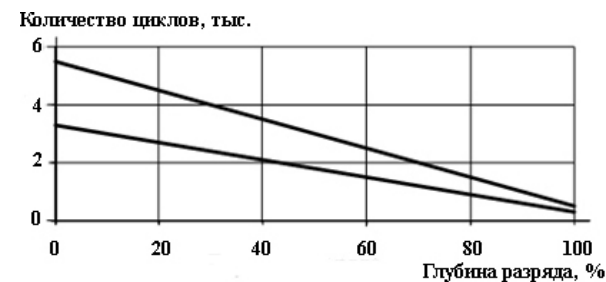


Рис. 4 - Изменение количества циклов заряда-разряда никель-кадмиевых аккумуляторов от глубины разряда

Выбор конкретного типа аккумуляторов для использования в системах энергоснабжения различных объектов определяется несколькими факторами:

- условиями работы в составе энергоустановки;

- режимом работы электрохимического аккумулятора в составе энергоустановки;
- временем функционирования;
- уровнем и видом циклограммы электропотребления;
- удельными характеристиками электрохимических аккумуляторов;
- стоимостью электрохимических аккумуляторов и энергоустановки в целом.

В данной статье нами рассматривается выбор электрохимического аккумулятора по критерию стоимости электрохимического аккумулятора и энергоустановки в целом. Остальные критерии выбора электрохимических аккумуляторов будут рассмотрены в других работах.

Анализ типов аккумуляторных батарей, используемых в системах энергоснабжения космических аппаратов. Современные аккумуляторы способны выдержать тысячи циклов заряда-разряда, что позволяет эксплуатировать их в течение десятков лет без замены [4, 5]. Для космических аппаратов, где обеспечение длительного ресурса и высокой надежности являются одним из основных требований, эта особенность весьма важна, и определяет широкое применение аккумуляторов различных электрохимических систем в энергоустановках космических аппаратов [7, 8].

Никель-кадмиевые аккумуляторы и батареи на их основе являются в настоящее время основным типом накопителей энергии, применяющимся в составе энергоустановок космических аппаратов. Никель-кадмиевые аккумуляторы используются чаще всего в составе энергоустановок космических аппаратов среднего ресурса (до нескольких лет), а также применяются в составе ракетных комплексов, где они находятся в дежурном режиме длительное время (до 20 лет с периодической заменой [7-10]).

Никель-водородные аккумуляторы были изобретены в СССР в начале 60-х годов, позднее началось их исследование в США и в других странах. Усилия разработчиков никель-водородных аккумуляторов направлены на достижение максимального срока службы, безопасности и значительной глубины разряда [7-10].

Литиевые аккумуляторы и батареи на их основе представляют собой широкий класс аккумуляторов с различными эксплуатационными характеристиками. Химические батареи на основе литиевых аккумуляторов считаются очень перспективными для использования в составе энергоустановок летательных аппаратов.

Однако их развитие все еще находится на ранних стадиях исследований и применения.

Анализ рынка аккумуляторов различных электрохимических систем показал, что на рынке электрохимических аккумуляторов представлен большой ряд как отечественных, так и зарубежных производителей, однако по удельным характеристикам не все из представленных аккумуляторов могут быть использованы в космической технике:

- литиевая электрохимическая система: A123 Systems (США), Altair Nanotechnologies (США), Samsung SDI (Республика Корея), EnerI Battery Company (США), Dow Kokam (США), The Saft Group (Франция), BYD (Китай), Valence Technology (США), НПО ССК (Россия), АК Ригель (Россия), НИИХИТ-2 (Россия), ОАО НИИИ «Источник» (Россия), ОАО Энергия (Россия) и др.;

- никель-кадмиевая электрохимическая система: Shenzhen Suppower Tech. Co., Ltd. (Китай), SANYO Energy Corporation (Япония), Panasonic Corporation (Япония), Курский аккумуляторный завод (Россия), ЗАО «УкрБат» (Украина), ОАО «Завод автономных источников тока» (Россия), VARTA Consumer Batteries GmbH & Co. KGaA (Германия), GP Batteries Int. Ltd. (Республика Корея), Samsung SDI (Республика Корея), GAZ Geräte-und Akkumulatorenwerk Zwickau GmbH (Германия) и др.;

- никель-водородная электрохимическая система: Уральский электрохимический комбинат (Россия), ОАО «Сатурн» (Россия) и др.

Основные параметры электрохимических аккумуляторов, применяемых в составе энергоустановок космических аппаратов приведены в табл. 1.

Критерии выбора электрохимических аккумуляторов для использования в составе системы энергоснабжения ракетно-космических объектов. Для электрохимических аккумуляторов величиной, определяющей их массогабаритные характеристики, является плотность энергии. С этой точки зрения наиболее перспективными являются литий-ионные аккумуляторы. Однако при эксплуатации электрохимических аккумуляторов в составе энергоустановок ракетно-космических объектов ограничивающими факторами является также ресурс аккумулятора – возможность работы аккумулятора не только длительное время, но и возможность аккумулятора выдерживать большое количество циклов заряда-разряда. Для обеспечения длительного срока эксплуатации электрохимических аккумуляторов на борту ракетно-космических

объектов необходимо кроме проектных параметров аккумуляторов особое внимание уделить и эксплуатационным параметрам этих аккумуляторов (таблица 2), а также возможности применения конкретного типа аккумулятора на различных ракетно-космических объектах.

Таблица 1 – Сравнение основных характеристик электрохимических аккумуляторов, применяемых в космических аппаратах

Параметры	Ni-Cd	Ni-H ₂	Li-ion
Номинальное напряжение, В	1.2	1.5	3.6
Плотность энергии, Вт·ч/кг	30...40	50...90	90...120
Удельная мощность, Вт/кг	150	100	1800
Ресурс, полных циклов	1500	3000	800
Ресурс, при эксплуатации согласно инструкции, лет	7	10	18
Саморазряд в месяц, %	20	30	10
Нагрузочный ток:			
–пиковый	20С	20С	2С
–оптимальный	1С	1С	1С
Рабочая температура, °С	-20...60	-20...40	-20 ...60
Стоимость, \$/Вт·ч	7	8	5

Практика показывает, что ресурс электрохимических аккумуляторов определяется не только совершенством конструкции аккумулятора, но и условиями его эксплуатации, поскольку при проектировании энергоустановок, как правило, основное внимание уделяется выходным характеристикам, а не обеспечению оптимального режима эксплуатации аккумуляторов. В таких случаях проявляется снижение технического ресурса за счет ускорения процессов деградации аккумуляторов вследствие неблагоприятных условий эксплуатации, которые также необходимо учитывать.

Критерии истечения ресурса также определяются согласно режимам и условиям эксплуатации. Так при эксплуатации в дежурном режиме без подзаряда необходимо учитывать в первую очередь сохраняемость заряда. В большинстве случаев для определения факта истечения ресурса аккумуляторов достаточно оценки по величине разрядной емкости.

Достижение заданного ресурса космического аппарата осуществляется за счет увеличения емкости химических батарей, их

резервирования и применения новых типов аккумуляторов, что приводит к существенному удорожанию космического аппарата.

Таблица 2 – Особенности электрохимических аккумуляторов различных электрохимических систем, их достоинства и недостатки

	Ni-Cd	Ni-H ₂	Li-ion
Достоинства	<ul style="list-style-type: none"> - накопленный большой опыт производства; - отработанность конструкции; - высокая надежность; - низкая стоимость; - высокая устойчивость к перегрузкам; - возможность восстановления. 	<ul style="list-style-type: none"> - хорошие энергетические и емкостные показатели; - низкая удельная масса; - высокая продолжительность времени активной работы; - возможность обеспечения больших разрядных токов. 	<ul style="list-style-type: none"> - высокое напряжение; - большая удельная емкость; - высокая плотность энергии; - относительно небольшой саморазряд; - низкая стоимость обслуживания; - отсутствие «эффекта памяти».
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> - небольшие значения удельных энергетических и емкостных показателей; - экологически загрязнен; - сложность в утилизации и переработке; - подверженность деградации; - небольшая допустимая глубина разряда; - наличие «эффекта памяти». 	<ul style="list-style-type: none"> - относительно большой удельный объем; - нетерпимость к перезаряду и переразряду. 	<ul style="list-style-type: none"> - более высокая первоначальная стоимость; - малая тепловая стабильность; - необходимость применения встроенной схемы защиты; - подверженность старению; - затруднено быстрое тестирование.

К энергетическим установкам для космических исследований предъявляется требование высокой удельной энергии, так как стоимость запуска в космос резко возрастает с увеличением массы. Например, уменьшение массы запускаемого аппарата на 200 кг приводит к экономии \$30 млн. Поэтому резервирование аккумуляторов в системах энергоснабжения значительно влияет на стоимость запуска

космического аппарата. Но не все аккумуляторы подвергаются резервированию. Например, литий-ионные аккумуляторы начинают деградировать уже с момента изготовления, поэтому ставить аккумуляторы такого типа на борт космического аппарата в виде резерва считается нецелесообразным. Такие батареи должны обладать сверхвысокой надежностью, в тоже время вес космического аппарата с литий-ионными батареями на борту будет значительно ниже. Замена никелевых аккумуляторов на литий-ионный позволяет снизить массу энергоустановки на 35-40%, сократить мощность зарядных устройств благодаря более высокой отдаче по энергии и уменьшить площадь радиатора для отвода тепла. В 2000 г. объем литий-ионных аккумуляторов, используемых в космической отрасли составлял 12 млн. шт.

При выборе электрохимических накопителей энергии для энергоустановок долгоживущих космических аппаратов нового поколения предлагается анализировать стоимость вывода аккумуляторов на заданную орбиту. Так, стоимость вывода 1 кг груза на низкую орбиту составляет \$20 тыс., на геостационарную орбиту до \$30 тыс.

Выбор типа аккумуляторов для использования в составе системы энергоснабжения космических аппаратов с точки зрения их стоимости. Вес аккумуляторной батареи может варьироваться в диапазоне от 6 до 80 кг в зависимости от типа, количества элементов, емкости. Для установленной емкости (380 А·ч) литий-ионная батарея будет весить приблизительно 25 кг, никель-кадмиевая – 150 кг, никель-водородная – 34 кг. Отсюда можно сделать вывод, что вес никель-водородной батареи превышает вес литий-ионной в 2 раза, при этом обеспечивая ту же емкость. Рассчитаем стоимость системы энергоснабжения в зависимости от различных типов аккумуляторных батарей.

Проведем расчет полной стоимости системы энергоснабжения с учетом стоимости аккумуляторных батарей по формуле (результаты приведены в табл. 3):

$$C_{\text{полн}} = \sum C_n + C_{\text{груза}} \cdot M_{\text{сп}}$$

где C_n – стоимость устройства преобразования мощности, системы управления потоком мощности, аккумулирующий элемент соответственно; а также следует учитывать стоимость удельных энергии и мощности и систему безопасности, особенно для химических накопителей энергии на основе литий-ионных элементов. Стоимость аккумуляторной батареи следует определять из учета

количества элементов, входящих в неё, а также брать во внимание резервирование;

$C_{\text{груза}}$ – стоимость груза;

$M_{\text{сп}}$ – масса системы, которая зависит от количества входящих в неё элементов.

Таблица 3 – Результаты расчета общей стоимости системы с различными типами аккумуляторных батарей

Тип аккумуляторной батареи	Масса аккумуляторной батареи (с учетом резервирования), кг	Стоимость 1 кг выводимого груза, тыс. \$ ¹	Стоимость аккумуляторной батареи, тыс. \$	Общая стоимость системы энергоснабжения, тыс. \$
Li-ion	25	15*25=375	1000	1375
Ni-H ₂	34, (2*34=68)	15*68=1020	500, (500*2=1000)	2020
Ni-Cd	150, (2*150=300)	15*300=4500	250, (2*250=500)	5000

¹Стоимость 1 кг выводимого груза принимаем равной \$15000, при необходимости расчета для GEO орбит значение увеличивается в 2 раза

Окончательную стоимость системы энергоснабжения можно определить, если стоимость вывода 1 кг груза на орбиту (стоимость может изменяться в зависимости от типа орбиты) умножить на общую массу спутника (без учета системы энергоснабжения). Таким образом, сумма двух выше упомянутых составляющих даст стоимость системы энергоснабжения.

Выводы. В результате проведенного анализа современных, перспективных типов электрохимических аккумуляторов энергоустановок космических аппаратов сформулированы рекомендации касательно выбора электрохимической системы для космических аппаратов сроком службы более 10 лет. Анализ показал, что наиболее оптимальным типом с точки зрения стоимости системы энергоснабжения, являются электрохимические системы на основе лития, применение литий-ионных аккумуляторов является наиболее экономически выгодным вариантом за счет высокой надежности и относительно низкой стоимостью обслуживания. При этом литий-

ионные аккумуляторы обладают большой удельной емкостью, обеспечивая необходимый ресурс космических аппаратов.

Список литературы: 1. Mukund R. Patel, *Spacecraft power systems* / R. Patel Mukund – New York, Washington D.C.: CRC Press, Boca Raton. -2008. –734р. 2. Конохов С.Н. Научно-технические направления разработок космических аппаратов КБ "Южное" им. М. К. Янгеля/ С.Н. Конохов // Космічна наука і технологія. – 1995. - №1. - С. 12 – 34. 3. Ванке В.А. Космические энергосистемы / В.А. Ванке и др. М.: Машиностроение, 1990. – 144 с. 4. Давидов А.О. Анализ систем электроснабжения стартовых комплексов современных ракет-носителей / К.В. Безручко, А.О. Давидов, К.Н. Земляной, В.П. Фролов. // Вестник Двигателестроения. Научно-технический журнал.–Запорожье, 2008.- № 3 .- С.41-44. 5. Безручко К.В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии / К.В. Безручко, С.В. Губин, – Х.: ХАИ, 2007 –310с. 6. Нижниковский Е.А. Химические источники автономного электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Е.А. Нижниковский. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 228 с. 7. Давидов А.О. Электрохимические аккумуляторы систем электроснабжения ракетно-космических летательных аппаратов / А.О. Давидов // Вісник Дніпропетровського Університету. Сер. Ракетно-космічна техніка / ДНУ. – Днепропетровск, 2008.– Вып 12 Т.2, №4.Т.16– С. 26-33. 8. Таганова А.А. Герметичные химические источники тока для портативной аппаратуры. Справочник / А.А. Таганова, И.А. Пак. – Санкт-Петербург: Химиздат., 2003 г. – 208 с. 9. Johnson P.J. Battery Performance Of The Skynet 4a Spacecraft. Final Report / P.J. Johnson, N.R. Francis – Hertfordshire, SG1 2AS: England Marta Marconi Space UK Ltd, 1999.–650р. 10. Кедринский И.А. Литиевые источники тока. / И.А. Кедринский, В.Е. Дмитренко, И.И. Грудянов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

Bibliography (transliterated): 1. Mukund R. Patel *Spacecraft power systems*. New York: Washington D.C.: CRC Press, Boca Raton.-2008. 2. Konjuhov S.N. Nauchno-tehnicheskie napravlenija razrabotok kosmicheskikh apparatov KB "Juzhnoe" im. M. K. Jangelja *Kosmichna nauka i tehnologija*. 1995. No 1. 12 – 34. Print 3. Vanke V.A. *Kosmicheskie jenergosistemy*. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 4. Davidov A.O. Bezruchko K.V Zemljanoj K.N. Frolov V.P. Analiz sistem jelektrosnabzhenija startovykh kompleksov sovremennykh raket-nositelej. *Vestnik Dvigatelsestroenija. Nauchno-tehnicheskij zhurnal*. 2008. No 3. 41-44 Print. 5. Bezruchko K.V. Gubin S.V *Avtonomnye nazemnye jenergeticheskie ustanovki na vozobnovljaemyh istochnikah jenerгии*. Harkov: HAI. 2007. 6. Nizhnikovskij E.A. *Himicheskie istochniki avtonomnogo jelektropitanija radiojelekttronnoj apparatury*. Moscow: Moscow energetical institute, 2004. 7. Davidov A.O. Jelektrohicheskie akumuljatory sistem jelektrosnabzhenija raketno-kosmicheskikh letatel'nyh apparatov. *Visnik Dnipropetrovs'kogo Universitetu. Ser. Raketno-kosmichna tehnika* / DNU. 2008 No 12 Vol.2, No 4. 26-33 Print 8. Taganova A.A. Pak I.A. *Germetichnye himicheskie istochniki toka dlja portativnoj apparatury. Spravochnik*. Sankt-Peterburg: Himizdat., 2003. 9. Johnson P.J. Francis N.R. *Battery Performance Of The Skynet 4a Spacecraft. Final Report*. Hertfordshire, SG1 2AS: England Marta Marconi Space UK Ltd, 1999. 10. Kedrinskij I.A., Kedrinskij I.A. Dmitrenko V.E., Grudjanov I.I. *Litievye istochniki toka*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1992.

Надійшла (received) 24.03.2014