

УДК 621.351.1

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИТИЙ-ТИОНИЛХЛОРИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Д. Б. Федотов, Н. И. Ялюшев¹, А. Н. Мафтей¹

ЗАО инженерная фирма «Орион-ХИТ», Новочеркасск, Россия

¹ФБОУ ВПО ЮРГТУ (НПИ), Новочеркасск, Россия

E-mail: fedotov_db@rambler.ru

Поступила в редакцию 04.06.13 г.

В статье представлен опыт применения химических источников тока электрохимической системы литий – хлористый тионил и батарей на их основе в бортовых системах электроснабжения современной и перспективной ракетно-космической техники России.

Ключевые слова: космический аппарат, блок выведения, химический источник тока, литий-тионилхлорид, батарея.

In article experience of application of chemical sources of a current of electrochemical system lithium – tionilchloride and batteries on their basis, in onboard systems of electrosupply of modern and perspective space-rocket technics of Russia is presented.

Key words: space vehicle, deducing block, chemical source of a current, lithium-tionilchlorid, battery.

Анализ статистики эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ) показывает, что происходит непрерывный рост количества ежегодных запусков космических аппаратов. За последнее десятилетие количество пусков ракет космического назначения в мире увеличилось на 38 % (в 2001 г. — 58 шт., в 2011 г. — 80 шт.) [1]. Такой рост использования РКТ неизбежно связан с постоянным развитием источников электроэнергии для неё (как по количественным, так и по качественным характеристикам). Требования, предъявляемые к источникам тока (ИТ), соответствуют назначению РКТ.

Назначение и условия эксплуатации различных видов РКТ значительно отличаются друг от друга. По этим характеристикам технику условно можно разделить на две группы:

1) космические аппараты (искусственные спутники земли, межпланетные станции, грузовые и пилотируемые корабли и т. д.);

2) средства выведения, которые, в свою очередь, можно разделить на:

— ракеты-носители — выведение космических аппаратов (КА) и блоков выведения на околоземные (опорные) орбиты;

— блоки выведения (разгонные блоки, космические буксиры) — выведение КА на солнечно-синхронные, геостационарные, геопереходные, высокоэллиптические, отлётные и другие орбиты.

Для КА требуются ИТ, способные длительно работать на орбите, для ракет-носителей (РН) необходимы ИТ с максимальной удельной мощностью и возможностью отработки всех предстартовых операций на штатных ИТ, а не от наземного оборудования. Для блоков выведения критичным является масса и, как следствие, ИТ должен обладать максимальной удельной энергией. Обобщённые критерии выбора ИТ по основным эксплуатационным характеристикам представлены в таблице.

Критерии оценки применимости источников тока для РКТ

Параметры ИТ	КА	РН	Блок выведения
Удельная энергия	0	–	+
Удельная мощность	0	+	–
Срок сохранности заряда	+	–	–
Необходимость технического обслуживания в процессе эксплуатации (наземной подготовки)	0	0	+
Циклируемость	+	–	–

Примечание. «+» — значение параметра решающее, «0» — значение параметра оценочное, «–» — значение параметра некритично.

В системах электроснабжения РКТ применяются химические источники тока двух типов — первичные и вторичные (аккумуляторы).

Среди аккумуляторов наибольшее распространение занимали серебряно-цинковые, никель-кадмиевые, никель-водородные. В последнее десятилетие на РН и КА все больше распространение получают литий-ионные аккумуляторные батареи.

Среди первичных химических источников тока (ХИТ) литиевые элементы и батареи имеют наиболее высокие достигнутые характеристики по перечисленным в таблице параметрам [2–4], поэтому они нашли применение в каждом из видов РКТ. Например, литиевые элементы и батареи производства фирмы SAFT (Франция) применяются во всех видах ракетно-космической техники, среди которых литий-тионилхлоридные ИТ применяются для блоков выведения [5].

Рассмотрим опыт использования литий-тионилхлоридных элементов и батарей для различных видов РКТ, уделив основное внимание ИТ производства ИФ «Орион-ХИТ» (г. Новочеркасск).

Применение литий-тионилхлоридных ИТ для КА

К ИТ, применяемым для данного вида РКТ, в основном относятся фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), так называемые солнечные батареи, и вторичные ИТ — аккумуляторные батареи (никель-водородные, никель-кадмиевые, никель-металлогидридные, в последние годы всё большее применение находят литий-ионные). При этом описанные ИТ (ФЭП и аккумуляторная батарея) работают на КА, дополняя друг друга (в буферном режиме). При наличии солнечной энергии электропитание в основном осуществляется от ФЭП, а аккумуляторная батарея в это время подзарядается. При заходе КА в тень электропитание осуществляется от аккумуляторной батареи. Однако используют и другие схемы построения системы электроснабжения (СЭС) КА. Одной из таких схем является установка в СЭС дополнительных первичных ИТ системы литий — хлористый тионил. Необходимость установки такого ИТ обусловлена возможностью долгого нахождения КА без солнечной энергии, недостаточностью ёмкости аккумуляторных батарей для определённых режимов работы КА (маневрирование, посадка и др.).

Впервые в СССР литий-тионилхлоридные ХИТ были применены на КА в 1982 г. НПО им. С. А. Лавочкина использовало элементы CSC 93 и ВСХ72 производства США в эксперименте по «воздухоплаванию» в атмосфере Венеры. Они обеспечивали питание радиопередатчиков аэростатных

зондов, передававших в течении 46 часов информацию об атмосфере Венеры. В дальнейшем литий-тионилхлоридные ИТ производства ИФ «Орион-ХИТ» применялись на КА НПО им. С. А. Лавочкина по программам «Фобос» в 1988 г. (батарея 11ТХЛ-200), «Интербол» в 1995 г. и «Марс-96» (батарея 10ER20S-24), «Фобос-грунт» в 2011 г. (батареи 10ER20P-22 и 9ER14PS-20). Перечисленные ИТ использовались для выполнения узконаправленных задач. К примеру, по программе «Интербол» батарея в течение пяти лет осуществляла питание научной аппаратуры КА при заходе в «солнечную тень», а по программе «Фобос» и «Фобос-грунт» батареи должны были обеспечить электроэнергией научную аппаратуру во время зависания КА над спутником Марса (программа «Фобос») и во время посадки на поверхность спутника (программа «Фобос-грунт»).

В 1996 г. батарея 9ER20S-4 (рис. 1) успешно проходит испытания в РКК «Энергия» и применяется как основной источник энергии служебных систем модуля «Природа» при выводе его на орбиту и стыковке со станцией «Мир».



Напряжение разомкнутой цепи — 32,8 В;
Номинальное напряжение — 30,5 В;
Номинальная ёмкость — 40 А·ч;
Масса — 6 кг

Рис. 1. Батарея 9ER20S-4 и её технические характеристики

Более 170 таких батарей общей ёмкостью около 7000 А·ч обеспечили возможность трёхкратного причаливания и стыковку модуля со станцией, полностью заменив общепринятую связку ФЭП-аккумуляторная батарея. Замена ИТ модуля «Природа» была вызвана необходимостью обеспечения возможности повторных заходов на стыковку. В противном случае, при маневрировании, вследствие значительных габаритов модуля, могли быть повреждены панели ФЭП орбитальной станции.

Начиная с 1993 г. для аппаратов серий «Фотон» и «Бион» (разработчик ГНПРКЦ «ЦСКБ Прогресс») предприятием ЗАО НПФ «ИТАЛ-ВС» (г. Химки) разработаны и эксплуатируются литий-тионилхлоридные батареи 8ТХЛА-250, 8ТХЛА-250У [6]. Отметим особенности данных батарей:

1) для набора необходимой ёмкости изготавливаются единичные элементы ёмкостью более 250 А·ч, которые соединяются между собой последовательно для набора необходимого напряжения;

2) данные батареи являются наливными, т. е. перед их эксплуатацией требуется специальная подготовка (залитка электролитом).

В настоящее время в ЗАО ИФ «Орион-ХИТ» проводятся работы по применению литий-тионилхлоридных ИТ в проектах «Луна-Ресурс» и «Луна-Глоб» для обеспечения электропитания КА в режиме посадки. Разрабатывается ИТ для двигателей мягкой посадки перспективного корабля нового поколения и двигателей системы аварийного спасения космонавтов.

Основные проблемы, выявленные в процессе эксплуатации литий-тионилхлоридных ИТ в составе КА, заключаются в следующем. Во-первых, свойство пассивации литиевого электрода в процессе хранения оказывает как положительный эффект — обеспечивает длительную сохранность заряда, так и отрицательный — обуславливает наличие «провала» напряжения при включении ИТ после длительного хранения, т. е. кратковременного (1–10 с) снижения напряжения до уровня, находящегося ниже допустимой по техническим требованиям границы. Данный эффект показан на рис. 2 на примере батареи 9ER20S-4. Во-вторых, отсутствуют методы диагностирования остаточной ёмкости литий-тионилхлоридных ИТ в процессе эксплуатации. Например, батарея 10ER20S-24 обеспечивала электроэнергией аппаратуру КА «Интербол» в течении 5 лет. Однако определить время, которое данный ИТ смог бы ещё работать в составе КА, не представлялось возможным, так как затруднительно было определить уже отданную ёмкость ХИТ. Знание величины остаточной ёмкости батарей позволило бы более оптимально вести расход электроэнергии в течение текущего сеанса и планировать эксперимент на последующее время.

Указанные проблемы к настоящему времени в той или иной степени решены. Для снижения влияния пассивации литиевого электрода подобраны определённые режимы предварительного включения ИТ на нагрузку до штатной работы, в процессе которого происходит разрушение пассивной плёнки, и отработаны технологические процессы, снижающие пассивацию литиевого электрода.

С целью прогнозирования остаточной ёмкости ИТ в состав батарей вводятся платы телеметрии, которые передают на Землю информацию о состоянии ИТ (уровень напряжения, температура ИТ, ток, потребляемый от ИТ, а также ёмкость,

отданная во внешнюю цепь). Зная исходную ёмкость ИТ, можно прогнозировать остаточную ёмкость батарей. Однако описанные выше решения лишь частично сглаживают проблемы, выявленные для литий-тионилхлоридных ИТ при применении в КА. Задачи улучшения сохранности мощности, повышения удельной энергии и совершенствования методов прогнозирования остаточной ёмкости остаются актуальными и по настоящее время, а их решение позволит расширить применение литий-тионилхлоридных ИТ в составе КА.

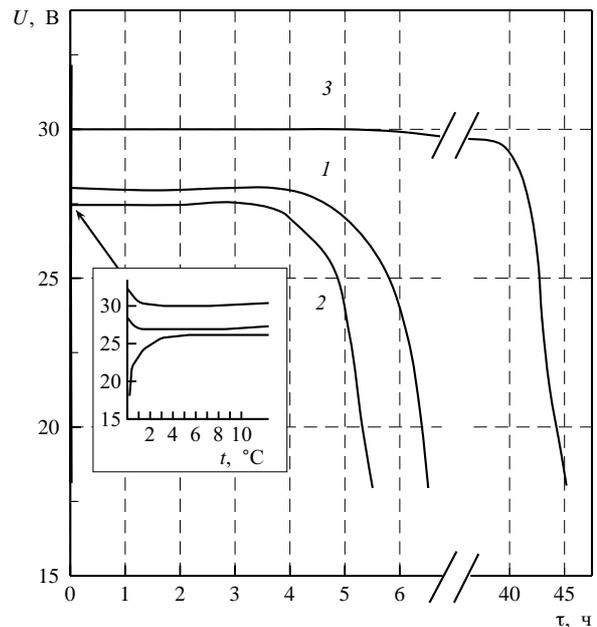


Рис. 2. Зависимость напряжения батареи 9ER20S-4 от тока разряда и времени хранения. Ток разряда: 1, 2 — 5 А; 3 — 1 А. Срок хранения: 1, 3 — 1 месяц; 2 — 3 года. Температура — 20°C

Применение литий-тионилхлоридных ИТ для РН

Основным требованием к ИТ, применяемым в ракетах-носителях космического назначения, является высокая удельная мощность. Данное обстоятельство связано с тем, что длительность работы РН невелика и составляет 10–15 мин, при этом токи нагрузки всех служебных систем РН высоки и могут достигать 1 кА. Исходя из описанного требования к ИТ, для РН изначально применялись серебряно-цинковые, никель-кадмиевые и тепловые батареи. Данные типы батарей применяются и в настоящее время (семейство РН «Союз», РН «Протон-М», РН «Зенит»). Наряду с описанными традиционными ХИТ, для РН стали применяться батареи на основе литиевых ХИТ — литий-ионных аккумуляторов, литий-диоксид серных и литий-тионилхлоридных элементов. На зарубежных ракетах-носителях традиционные ИТ уже давно вытесняются

литиевыми ХИТ [5]. В нашей стране этот процесс находится на начальном этапе — проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке литиевых ХИТ для РН.

Применение литий-тионилхлоридных ИТ на РН затруднено двумя основными факторами. Во-первых, раствор электролита на основе хлористого тионила обладает более низкой электропроводностью, чем электролиты традиционных (водных) ХИТ и литиевых с органическими апротонными электролитами. Во-вторых, пассивная плёнка, образующаяся на литиевом электроде при взаимодействии с раствором электролита, значительно снижает мощность источника тока. Во время хранения скорость процесса пассивации литиевого электрода замедляется, но полностью не прекращается [4]. Таким образом, снижение мощности батарей на основе элементов системы литий—тионилхлорид, вследствие влияния описанных факторов, не позволило на более ранней стадии применять их для РН. Однако в процессе модернизации и отработки технологии элементов системы литий—тионилхлорид к настоящему времени удалось создать элементы с повышенными мощностными характеристиками и сохранностью мощности.

Первым опытом использования в нашей стране литий-тионилхлоридных ИТ в РН было применение батареи 10ER14PS-2 (рис. 3) для системы безопасности РН «Днепр», а батарея 9ER14P-4 была применена для системы телеметрии РН «Штиль» и «Волна».



Напряжение разомкнутой цепи — 36,5 В;
Номинальное напряжение — 34 В;
Номинальная ёмкость — 7,0 А·ч;
Масса — 2 кг

Рис. 3. Батарея 10ER14PS-2 и её технические характеристики

Наряду с описанными выше недостатками, у литий-тионилхлоридных ИТ постоянной готовности есть неоспоримое преимущество, заключающееся в сравнительно высоком уровне достигнутой

удельной энергии (250–350 Вт·ч/кг). Данный параметр позволяет все предстартовые операции с РН проводить на штатном комплекте бортовых батарей и отказаться от применения для этих целей наземного электрооборудования, что значительно удешевляет и упрощает операции по подготовке РН к пуску.

Указанные обстоятельства приводят к заключению, что применение литий-тионилхлоридных батарей для РН перспективно при условии решения проблемы повышения мощности и улучшения её сохранности.

Применение литий-тионилхлоридных ИТ для блоков выведения (разгонных блоков)

Блоки выведения (далее — разгонные блоки (РБ)) — это группа РКТ наиболее требовательная к массе всех служебных систем, установленных на них. Данное обстоятельство связано с тем, что меньшая масса оборудования позволяет выводить большую массу КА или вывод КА осуществлять на более высокие орбиты. Также делается возможным более точное выведение за счёт большего количества включений двигательной установки при большем запасе топлива. Исходя из приведённых требований и описанных преимуществ, наиболее приемлемым ИТ для РБ являются батареи на основе элементов системы литий — хлористый тионил.

До появления литиевых источников тока на РБ в основном использовались серебряно-цинковые ИТ. Порядок работы с ними был сложен и затруднён необходимостью их заряда и технического обслуживания. При этом срок хранения в заряженном состоянии таких батарей редко превышал 30 суток. Масса серебряно-цинковых батарей в 2–3 раза больше, чем у современных литиевых источников тока для РБ.

Источники тока системы серебро—цинк применялись на первых поколениях РБ серии DM разработки и производства РКК «Энергия». Для повышения характеристик РБ серии DM в проекте «Морской старт» произведена разработка бортовых батарей на основе элементов системы литий - хлористый тионил взамен ИТ системы серебро—цинк. В марте 1999 г. осуществлён первый запуск КА по программе «Морской старт». Модернизированный РБ DM-SL обеспечивался электроэнергией от литиевых батарей 9ER14P-24 и 9ER20P-28 (рис. 4). Первая батарея служит для обеспечения работы аппаратуры модуля РБ, вторая — для энергообеспечения систем и агрегатов приборного отсека РБ.



Напряжение разомкнутой цепи — 32,8 В;
 Номинальное напряжение — 31 В;
 Номинальная ёмкость — 280 А·ч;
 Масса — 38,5 кг.

Рис. 4. Батарея 9ER20P-28 и её технические характеристики

В настоящее время в России эксплуатируются и разрабатываются десять РБ и лишь два из них — «Бриз-М» и «Бриз-КМ» — обеспечиваются электропитанием от батарей на основе системы литий-фторуглерод (ФУЛ-150М). Остальные РБ обеспечиваются электропитанием за счёт литий-тионилхлоридных батарей. Назовем некоторые из них.

1. РБ «Фрегат» и РБ «Фрегат-СБ» (НПО им С. А. Лавочкина) — батареи 9ER14PS-20, 9ER20P-16, 9ER20P-5. К настоящему моменту осуществлено 37 запусков космических аппаратов с использованием данных РБ, из них РБ «Фрегат» — 35 шт., «Фрегат-СБ» — 2 шт. [1]. Типовые зависимости напряжения и температуры батарей 9ER14PS-20 (ХИТ 1 и ХИТ 2) при выводе межпланетной станции «Марс-Экспресс» в июне 2003 г. представлены на рис. 5–8. В процессе работы напряжение батарей не опускалось ниже 27 В даже при разряде током около 20 А (рис. 7), температура батарей не превышала 70°C, хотя средний ток разряда ХИТ 1 был выше 12 А (рис. 6).

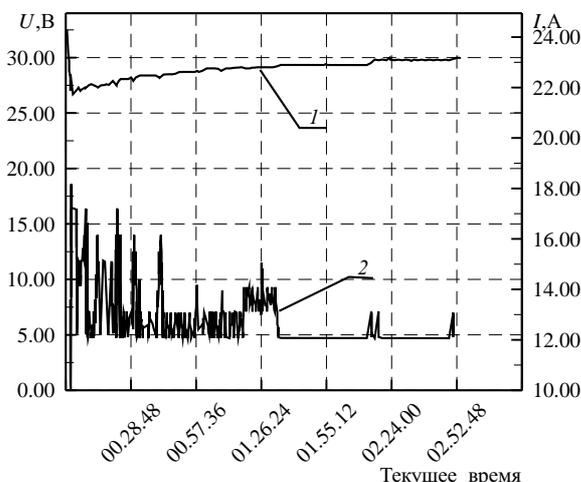


Рис. 5. Графики изменения напряжения и тока батареи 9ER14PS-20 (ХИТ 1) при выводе межпланетной станции «Марс-Экспресс»: 1 — напряжение; 2 — ток

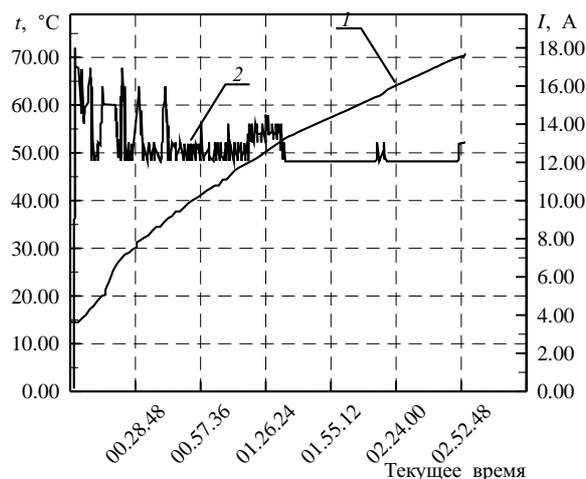


Рис. 6. Графики изменения температуры и тока батареи 9ER14PS-20 (ХИТ 1) при выводе межпланетной станции «Марс-Экспресс»: 1 — температура; 2 — ток

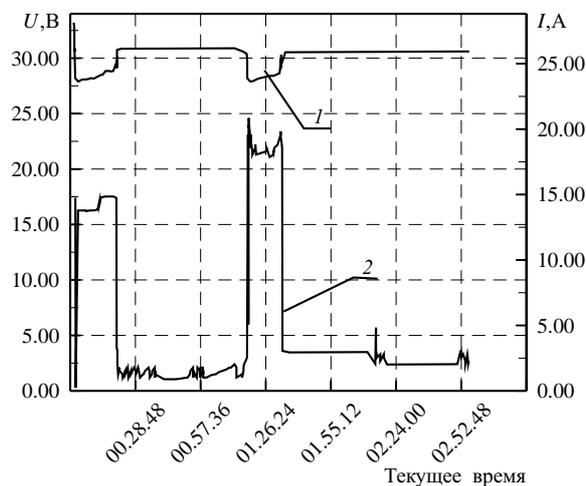


Рис. 7. Графики изменения напряжения и тока батареи 9ER14PS-20 (ХИТ 2) при выводе межпланетной станции «Марс-Экспресс»: 1 — напряжение; 2 — ток

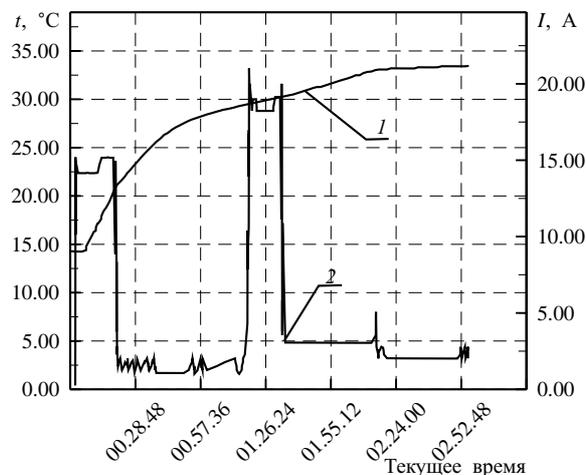


Рис. 8. Графики изменения температуры и тока батареи 9ER14PS-20 (ХИТ 2) при выводе межпланетной станции «Марс-Экспресс»: 1 — температура; 2 — ток

2) РБ DM-SL, РБ DM-SLB, РБ 11С861-03 (РКК «Энергия») — батареи 9ER14P-24, 9ER14PS-24, 9ER20P-28, 9ER20P-20. К настоящему моменту осуществлено 40 запусков космических аппаратов с использованием данных РБ [1]. Типовые зависимости напряжения батарей 9ER20P-28 и 9ER14P-24 при выводе КА Sicral-1В в апреле 2009 г. представлены на рис. 9, 10. Как показывают приведённые данные, батареи в состоянии работать при токах нагрузки до 77 А при приемлемом для РБ уровне напряжения.

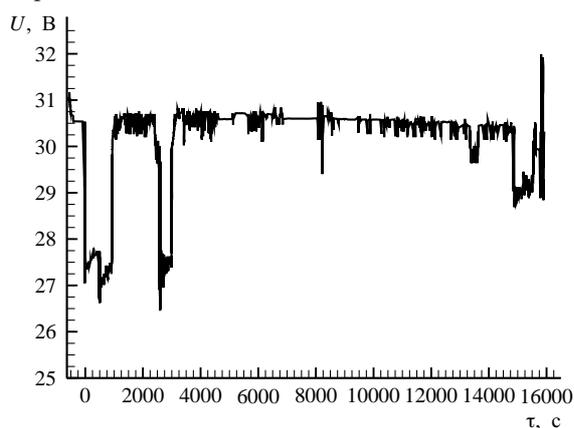


Рис. 9. Графики изменения напряжения батареи 9ER14P-24 при выводе космического аппарата Sicral-1В. Токи нагрузки 40–77 А

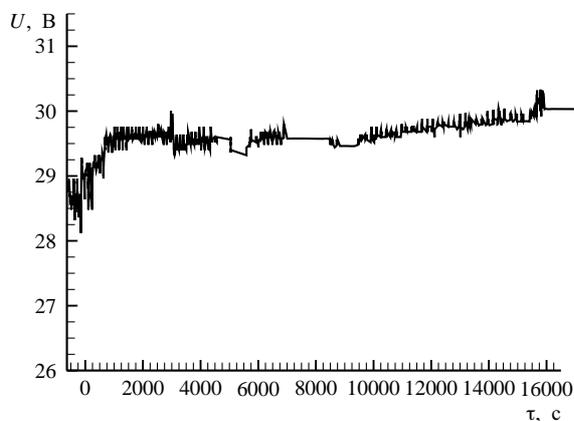


Рис. 10. Графики изменения напряжения батареи 9ER20P-28 при выводе космического аппарата Sicral-1В. Токи нагрузки 16–22 А

Описанные батареи, эксплуатировавшиеся на первых образцах РБ серий «Фрегат» и «DM», имели удельную энергию 225–250 Вт·ч/кг. Благодаря проведённым модернизациям значение удельной энергии данных батарей за последние 5 лет увеличено до 280–300 Вт·ч/кг.

По результатам ОКР, проведённой в интересах ГНПРКЦ «ЦСКБ Прогресс», разработана батарея 9ER20PSB-12 (рис. 11), удельная энергия которой достигает 320 Вт·ч/кг. При этом сохранены все показатели надёжности и безопасности батарей,

заданные требованиями к РКТ нормативной документацией. В настоящее время батареи проходят подготовку к лётным испытаниям в составе блока выведения «Волга».



Напряжение разомкнутой цепи — 32,8 В;
Номинальное напряжение — 31 В;
Номинальная ёмкость — 150 А·ч;
Масса — 14,5 кг

Рис. 11. Батарея 9ER20PSB-12 и её технические характеристики

Как показал опыт эксплуатации литий-тионилхлоридных батарей в составе РБ, они полностью удовлетворяют требованиям данного вида РКТ как по надёжности, так и по энергетическим характеристикам. При последующем модернизировании и улучшении эксплуатационных характеристик батарей на основе электрохимической системы литий — хлористый тионил займут доминирующие позиции в системе электроснабжения РБ и могут вытеснить все существующие на данный момент электрохимические системы.

Проведённый анализ опыта применения, возможностей и перспективных областей применения литий-тионилхлоридных ИТ в РКТ показал, что они весьма успешно используются во всех описанных видах РКТ. Наиболее освоенной областью применения литий-тионилхлоридных батарей в РКТ являются разгонные блоки. В процессе последующей модернизации и улучшения ряда параметров литий-тионилхлоридных ИТ следует ожидать расширения применения данных батарей и в других видах РКТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цитируется по сайту: Markus Bax, Betriebs Gesellschaft mbH, www.space.skyrocket.de, дата обращения 20.02.2012 г.
2. Коровин Н. В., Скундин А. М. Химические источники тока: справочник. М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 2003.
3. Кролтон Т. Первичные источники тока: пер с англ. М.: Мир, 1986.
4. Кедринский И. А., Дмитренко В. Е., Грудянов И. И. Литиевые источники тока. М.: Энергоатомиздат, 1992.
5. Цитируется по сайту: SAFT, Specialty Battery Group, www.saftbatteries.com, дата обращения 23.04.2013 г.
6. Гуртов А. С., Ивков С. В., Мищенко С. И., Пушкин В. И., Фомакин В. Н., Харгазов Е. И. // Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах: материалы XII Междунар. конф./ под ред. В. В. Галкина; Кубанский гос. ун-т. Краснодар, 2012. С. 68–72.