

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 621.311.6:629.78

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИОНИСТОРОВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.И. Галушко, Ю.И. Гром,
А.Н. Лазарев, Р.С. Салихов
(ОАО «НИИЭМ»)

Изложены предварительные результаты исследования свойств ионисторов и разработки схемотехнических решений для эффективного их применения.

Ключевые слова: ионисторы (суперконденсаторы), система электроснабжения КА, источники электропитания, аккумуляторные батареи, DC/DC преобразователи.

Назначение и область применения ионисторов

Ионисторы – это энергонакопительные конденсаторы с двойным электрическим слоем [1]. Термин «ионистор» (аналог – суперконденсатор) относится к молекулярным накопителям энергии и впервые зарегистрирован в ОАО «НИИ Гириконд» [2].

Они превосходят аккумуляторные батареи в части ресурса, быстродействия, диапазона рабочих температур, удельной мощности в режиме разряда. Ионисторы экологичны, экономичны, не требуют обслуживания. Появление на отечественном рынке промышленно освоенных ионисторов позволяет приступить к созданию портативных автономных источников электропитания с улучшенными энергетическими характеристиками.

Главное достоинство ионисторов это – на несколько порядков большая ёмкость, чем у любых других классов конденсаторов. Ионисторы по удельной энергии и удельной мощности занимают промежуточное положение между химическими источниками тока (аккумуляторами) и электролитическими конденсаторами, но в отличие от аккумуляторов сохраняют работоспособность в широком температурном диапазоне от -50 до $+85$ °С при числе циклов заряд – разряд до 10^6 . Их ёмкость составляет до нескольких тысяч фарад при напряжении от 2,3 до 5 В. В отличие от аккумуляторов ионисторы не нуждаются в обслуживании в течение всего срока эксплуатации.

В иностранной литературе ионисторы известны под названиями: supercapacitor, ultracapacitor, ultracap и варианты сочетания этих терминов.

В качестве электродов в ионисторах чаще всего применяются микропористые электронные проводники с высокой удельной пористостью, например, различные активированные углеродные материалы. Они содержат большое количество пор с размерами порядка 10^{-9} м (область наноразмеров) и имеют удельную поверхность

более 10^6 м²/кг. Ионисторы являются продуктом высоких технологий, в их работе нашли применение квантовые эффекты и эффекты межмолекулярных взаимодействий. Этим объясняются их высокое быстродействие, высокая удельная ёмкость и другие свойства, отличающие ионисторы от электролитических конденсаторов и аккумуляторных батарей (АБ).

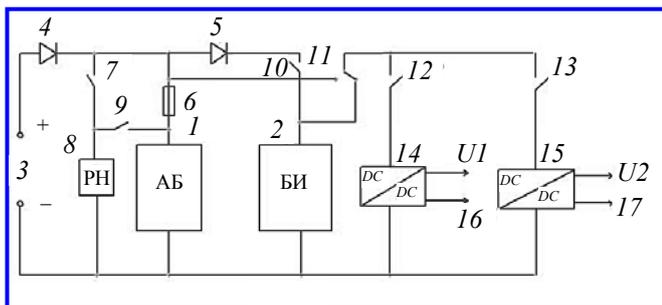
По сравнению с литий-ионными АБ, нашедшими применение в космической аппаратуре, ионисторы обладают уникальной комбинацией эксплуатационных характеристик:

- на порядок большей плотностью мощности;
- быстрым зарядом и глубоким разрядом;
- возможностью работы в жёстких климатических условиях (от -50 до $+85$ °С);
- большим количеством циклов заряда – разряда (до 10^6);
- сроком службы до 20 лет.

Уникальным свойством ионистора является длительное время сохранения заряда из-за нелинейной зависимости тока саморазряда от напряжения. Так, после снижения напряжения на ионисторе до $\sim 70\%$ от номинального по причине саморазряда, срок хранения оставшегося заряда резко увеличивается от нескольких месяцев до нескольких лет [2].

Потери энергии при зарядке, разрядке и выделение тепла минимальны. Ионисторы отличаются высокой устойчивостью к превышению напряжения, а по завершению срока службы их можно утилизировать без ущерба окружающей среде, они соответствуют стандартам RoHS согласно директиве Евросоюза 2002/95/ЕС.

В бортовых космических системах традиционно используются АБ, однако происходящие в них химические процессы могут привести к их отказу, который невозможно предвидеть заранее. В связи



Блок-схема опытного образца комбинированного источника питания

с этим в структуре системы электропитания должен быть предусмотрен резервный источник, запуск которого производится в течение 10 – 15 мс после отключения основного. Для этой цели идеально подходят ионисторы, которые мгновенно компенсируют провалы в электропитании и совместно с аккумуляторами могут обеспечить непрерывную работу бортовой сети.

Технические характеристики ионисторов

В таблице приведены сравнительные характеристики ионисторов и аккумуляторов распространенных типов.

Быстродействие ионисторов благодаря небольшой постоянной времени RC при выходе на полную потребляемую мощность составляет 10 – 30 мкс.

При этом ионисторы значительно уступают литий-ионным АБ по удельной энергии [4].

Несмотря на это приведённые характеристики свидетельствуют о наличии технически значимых преимуществ блока ионисторов (БИ) перед используемыми в настоящее время АБ и дают основания считать их полезными для использования в КА, например, в разработках модифицированных систем ориентации в качестве источника гарантированного питания.

Описание и обоснование схмотехнических решений

В ОАО «НИИЭМ» ведутся работы по исследованию режимов работы БИ в системе электроснабжения КА в следующих режимах:

- накопления избыточного количества электроэнергии, поступающей от внешнего источника;
- отдачи энергии в нагрузку в режиме пикового потребления;
- обслуживания систем КА в случае параметрического отказа АБ, вызванного выходом температуры эксплуатации за пределы допустимого для АБ;
- автоматическом переводе питания нагрузки от заряженного ионистора в критических ситуациях;
- хранения резервного заряда в течение длительного времени.

Блок-схема опытного образца комбинированного источника питания приведена на рисунке [5].

Аккумулятор 1, например, литий-ионный типа 4ЛИА-2 и блок ионисторов 2, например, типа РСКО650Э027 соединены параллельно и подключены к клеммам 3 для соединения с зарядным устройством от внешнего источника питания (например от солнечной батареи) через диоды развязки 4, 5, например, типа КД203М. При этом в цепь заряда аккумулятора включено токовое реле 6, например, типа РСТ14-1, а через его нормально открытый контакт 7 подключено реле напряжения аккумулятора 8, например, типа РЭВ-820 (полные схемы подключения реле 6 и 8 на рисунке не показаны). Нормально открытые контакты (НОК) указанных реле 7, 9, 10 включены в цепь заряда соответственно аккумулятора 1 и ионистора 2. Дополнительный перекидной контакт 11 реле напряжения аккумулятора введён в общую цепь питания стабилизированных преобразователей напряжения 12, 13 с выходным напряжением 28 и 5 В, например, типа МТС15028S28 ($U_{вх} = 10 - 40$ В, $U_{вых} = 28$ В, 150 Вт) и К7803Т-500 ($U_{вх} = 4,5 - 28$ В, $U_{вых} = 5$ В, 2,5 Вт), в входной цепи которых установлены управляемые ключи 14, 15, например, транзисторы КТ710А.

Работа описанного источника питания осуществляется следующим образом.

В исходном состоянии при подключении внешнего зарядного устройства 3 происходит заряд аккумулятора через обмотку реле тока заряда 6 по цепи:

Характеристики серийно выпускаемого блока ионисторов типа 20ЭК901-29 производства ОАО «Энергия» [3]

Показатели	Аккумуляторы			Ионисторы
	Кислотные	Щелочные	Литий-ионные	Промышленные
Удельная энергия, Вт ч/кг	20 ... 40	15 ... 80	80 ... 220	2 ... 10
Удельная мощность, Вт/кг	100 ... 300	500 ... 1300	800 ... 3000	1200 ... 1500
Количество циклов	100 ... 400	300 ... 2000	300 ... 500	1 000 000
Рабочие температуры, °С	-20 ... +40			-50 ... +85

+3 – 4 – 6 – 3. Большой начальный ток заряда аккумулятора 1 приводит к срабатыванию реле 6 и замыканию его НОК 7. При этом срабатывает реле напряжения аккумулятора 8, замыкает свой НОК 9 и подключается на зажимы аккумулятора 1 для контроля его напряжения заряда.

Кроме того, реле напряжения аккумулятора 8 замыкает свой НОК 10 в цепи заряда ионистора 2, а также переводит свой перекидной контакт 11 на подключение цепи нагрузки к аккумулятору 1. Диод развязки 5 препятствует передаче энергии от ионистора 2 в аккумулятор 1. По мере уменьшения тока аккумулятора 1 в процессе заряда происходит отпадание реле тока заряда 6 и размыкание его НОК 7. Контроль напряжения на аккумуляторе 1 осуществляется с помощью реле напряжения 8.

При уменьшении напряжения заряда аккумулятора 1 ниже заданного допустимого уровня (уход в «тень» солнечной батареи, большое потребление нагрузкой) происходит отпадание реле напряжения 8 и его перекидной контакт 11 переводит цепь питания нагрузки на заряженный ионистор 2.

При снижении температуры корпуса аккумулятора 1 ниже заданного допустимого уровня его напряжение заряда уменьшается, что также приводит к срабатыванию реле напряжения 8 аккумулятора 1 и переключению его перекидного контакта 11 на питание нагрузки от ионистора 2.

При достижении нормальных температурных условий аккумулятор 1 вновь вводится в схему и его заряд может пополняться от внешнего источника 3.

Передача энергии в нагрузку происходит путём замыкания управляемых электронных ключей 12, 13 на входе стабилизированных преобразователей напряжения 14, 15.

Управление ключами 12, 13 осуществляется по специальной логической схеме. Эта схема предусматривает постоянное проводящее состояние ключей при разряде аккумулятора 1 и невозможности приёма управляющего сигнала на эти ключи с земли. В этом случае происходит автоматический перевод питания нагрузки от заряженного ионистора 2. Длительность питания нагрузки в таком аварийном режиме, например, током до 2 А может составлять несколько десятков минут.

Как пример, предлагаемый стабилизированный комбинированный источник электропитания может быть выполнен на основе:

– литий-ионной аккумуляторной батареи 29,2 В в составе двух элементов типа 4ЛИА-2, 14,6 В, 2400 мА·ч, соединённых последовательно;

– блока ионисторов 27 В, 65 Ф в составе десяти элементов РСКО650Э027, 650 Ф, 2,7 В, соединённых последовательно;

– преобразователей напряжения DC/DC типа МТС15028S28 ($U_{вх} = 10 - 40$ В, $U_{вых} = 28$ В) и К7803Т-500 ($U_{вх} = 4,5 - 28$ В, $U_{вых} = 5$ В).

Общий вес опытного образца не превышает 3 кг при мощности до 250 Вт.

Программа экспериментальных исследований опытного образца комбинированного источника электропитания предусматривает:

– определение временных вольт-амперных характеристик (ВАХ) ионисторов в нормальных климатических условиях, а также при температуре от -50 до $+50$ °С;

– исследование ВАХ при повышенной влажности 98% и температуре $+40$ °С;

– исследование ВАХ в условиях вакуума при разряженности до 10^{-6} мм рт. ст.;

– исследование вибрационной стойкости при воздействии широкополосной случайной вибрации;

– анализ радиационной стойкости с учётом характеристик используемых материалов.

Зная параметры БИ, можно рассчитать длительность тока в нагрузке, например, 1 А при заданном перепаде напряжений, например, от номинального 29 до 10 В по формуле

$$t = C\Delta U/I \approx 20 \text{ мин.}$$

При этом напряжение на нагрузке остаётся стабильным на уровне 28 и 5 В и поддерживается с точностью $\pm 0,2\%$ при изменении входного напряжения и с точностью $\pm 0,3\%$ при изменении нагрузки.

Ожидаемые технико-экономические показатели

Предварительные расчёты технико-экономических показателей сводятся к оценке затрат на приобретение комплектующих и ожидаемое изменение массогабаритных показателей КА, связанных с установкой блока ионисторов.

За счёт улучшения энергоэффективности и повышения надёжности работы системы энергопитания, технические характеристики КА, такие как срок активного существования, стабильность работы его служебных систем и показатели надёжности улучшаются.

Запланированные работы по созданию источника бесперебойного питания ведутся таким образом, чтобы получить возможность применения их результатов в сферах хозяйственной деятельности, где используются автономные нестабильные источники возобновляемой энергии, таких как: ветроэнергетика и гелиоэнергетика. Кроме того,

предлагаемые схемы энергонакопителей могут быть полезными в устройствах с периодическим или кратковременным режимом работы: в устройствах охранной сигнализации, периодического освещения и тому подобное.

Проектирование схемы с использованием БИ ведётся на основе широкого применения стандартных блоков и комплектующих, изготовленных на отечественных предприятиях.

Литература

1. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): Разработка и производство / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская [и др.] // Компоненты и

технологии. – М., 2006. – № 6. – С. 12 – 16.

2. ОСТ 11074.008. Конденсаторы постоянной ёмкости. Классификация и система условных обозначений. – Введён 1991 – 05 – 03.

3. Электрохимические конденсаторы : каталог продукции ОАО «Энергия», 2011.

4. Развитие и внедрение нанотехнологий как инструмент инновационного развития предприятий ракетно-космической промышленности / Материалы семинара в учебно-методическом центре ИПК «МАШПРИБОР». – Королев : Федеральное космическое агентство. – 12 – 13 октября 2010.

5. Заявка Российская Федерация. Стабилизированный комбинированный источник электропитания. – заявитель ОАО «НИИЭМ». – 2012121375/032278.

Поступила в редакцию 03.05.2012

*Алексей Иванович Галушко, канд. техн. наук, начальник сектора.
Юрий Иванович Гром, канд. техн. наук, старший научн. сотрудник.
Александр Николаевич Лазарев, начальник отдела.
Т. (495) 994-53-23.*

*Рашид Салихович Салихов, канд. техн. наук, зам. генерального директора по космическим системам т. (495) 994-51-42.
E-mail: lazarev@istranet.ru.*