

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА-РАЗРЯДА БЛОКА ИОНИСТОРОВ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

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

*Изложены результаты исследований процессов заряда-разряда блока ионисторов К58-21-2,3В-3500Ф, который может быть использован в качестве резервного источника в системе энергоснабжения (СЭС) космических аппаратов (КА).*  
**Ключевые слова:** ионисторы (суперконденсаторы), источники электропитания, DC-преобразователи, СЭС, КА.

Ионисторы как накопители энергии могут быть использованы в качестве вторичных источников электроэнергии для питания нагрузки самостоятельно или в составе комбинированных, наряду с аккумуляторными батареями (АБ), источников бесперебойного электропитания. Их применение перспективно в качестве резервных источников электропитания СЭС с высокими требованиями по надёжности и жёсткими температурными условиями эксплуатации. Известно, что АБ требуют специальных режимов заряда, не допускают глубокого разряда, требуют термостабилизации при температурах ниже 10°C. Всех этих недостатков лишены ионисторы, не требующие, к тому же, обслуживания при эксплуатации. Число циклов заряда-разряда ионисторов достигает  $10^6$ , а диапазон рабочих температур находится в пределах от -45 до +70 °C.

Принцип работы ионисторов отличается от работы обычных конденсаторов из-за образования в них двойного электрического слоя [1] и подробно изложен в [2]. В статье приведены результаты исследования процессов заряда блока ионисторов (БИ), состоящего из последовательно соединённых единичных ионисторов К58-21-2,3В-3500Ф.

При заряде БИ наблюдается значительная неравномерность распределения напряжений на отдельных ионисторах. Это является следствием разброса параметров элементов в блоке, главным образом, величины ёмкости, внутреннего сопротивления и тока утечки. Ионисторы с пониженной ёмкостью и высоким внутренним сопротивлением имеют тенденцию к большим колебаниям значений напряжения во время заряда и разряда, что чревато разрушением двойного электрического слоя.

Отклонение напряжения в минус приводит к уменьшению накопленного заряда блока, а отклонение в плюс может разрушить двойной электрический слой ионистора и вывести ионистор из

строя. Для обеспечения надёжной работы не должно быть превышения напряжения на любом из последовательно соединённых ионисторов БИ во время заряда. Решение проблемы достигается применением одного из способов активного или пассивного выравнивания напряжения [3]. Однако эти способы обладают существенными недостатками.

Способ пассивного выравнивания напряжения осуществляется путём параллельного подключения к ионисторам резистивного делителя напряжения. При зарядке блока часть энергии зарядного источника выделяется на резисторах в виде бесполезного тепла, снижая при этом КПД накопителя электроэнергии.

Способ активного выравнивания напряжения предусматривает подключение к ионисторам аналоговых компараторов, на один вход которых подаётся опорное напряжение, а на другой – текущее напряжение заряда. При заряде БИ аналоговый компаратор сравнивает опорное напряжение с напряжением на ионисторе, и в случае превышения напряжения на ионисторе происходит подключение разрядного резистора с помощью коммутирующего элемента на выходе компаратора. Избыточный заряд ионистора расходуется на разрядном резисторе с выделением тепла.

Таким образом, известные способы выравнивания напряжений при заряде БИ характеризуются низкой энергоэффективностью и снижением надёжности СЭС.

В ОАО «НИИЭМ» предложен и исследован новый способ выравнивания напряжения [4], цель которого – не допустить превышения напряжения выше номинального на любом из ионисторов и зарядить БИ до номинального уровня напряжения с минимальными энергозатратами. Суть этого способа состоит в том, что напряжение основного источника заряда подаётся на блок ионисторов, в процессе заряда осуществляют периодический контроль напряжения на входе блока и на каждом ио-

нисторе в блоке. При этом с заданной периодичностью измеритель напряжения подключают последовательно к каждому ионистору и при достижении номинального значения напряжения на любом из них отключают источник заряда. Затем с помощью коммутатора «недозаряженный» ионистор подключается к дополнительному источнику подзаряда до достижения на нём номинального напряжения. Этот цикл измерения напряжения и подзаряда повторяется до достижения полного заряда всех ионисторов в блоке.

Способ предусматривает:

- на начальной стадии БИ процесс заряда происходит с током, соответствующим номинальному значению для данного типа ионисторов;
- в процессе заряда с помощью измерителя напряжения и коммутатора выполняется последовательно от ионистора к ионистору определение текущего значения напряжения заряда;
- при достижении номинального напряжения на любом из ионисторов источник зарядного напряжения отключается; а «недозаряженные» ионисторы последовательно подключаются к дополнительному источнику подзаряда;

– окончание процесса заряда происходит при достижении номинального напряжения блока.

На рис. 1 приведена блок-схема устройства, реализующая предлагаемый способ заряда.

Устройство содержит основной источник напряжения 1, блок ионисторов 2, измеритель напряжения 3, коммутационное устройство 4 и дополнительный источник напряжения дозаряда 5. При этом коммутационное устройство 4 выполняет функцию последовательного во времени соединения измерителя напряжения 3 с каждым из ионисторов в блоке 2, отключения основного источника напряжения 1 и подключения дополнительного источника напряжения дозаряда 5.

Устройство работает следующим образом.

Напряжение основного источника 1 поступает на блок ионисторов 2. В процессе заряда коммутационное устройство 4 с заданной тактовой частотой подключает измеритель напряжения 3 поочередно к каждому из ионисторов блока 2. При достижении на любом из них номинального значения напряжения коммутационное устройство 4 отключает основной источник напряжения 1 и заряд блока ионисторов 2 прекращается. Одновременно

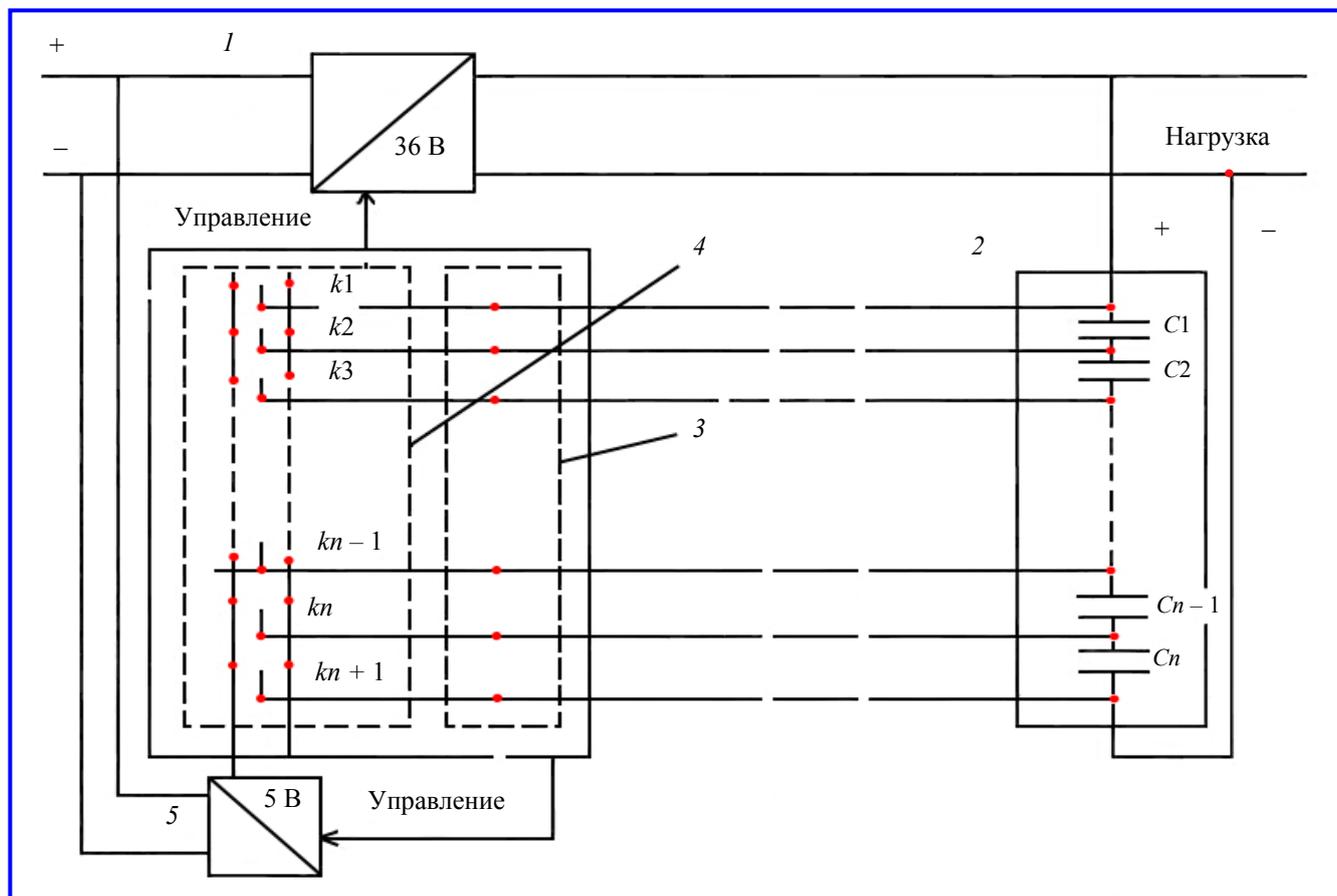


Рис. 1. Блок-схема устройства заряда блока ионисторов

коммутационное устройство 4 подключает первый «недозаряженный» ионистор к дополнительному источнику дозаряда 5.

В штатной схеме питание СЭС осуществляется от АБ, а в случае нештатной ситуации (например, захлаживание или недозаряд АБ на «теновом» участке орбиты КА) питание автоматически переходит от резервного источника энергии в виде БИ и DC-преобразователя. Предварительный заряд БИ осуществляется от бортовой солнечной батареи и может храниться в течение длительного времени. Схема такого стабилизированного комбинированного источника электропитания предложена в [5], а общий вид лабораторного образца представлен на рис. 2.

Теновый участок, например, для КА «Ионозонд» по продолжительности составляет 37 мин. В этот период в случае отказа АБ питание нагрузок СЭС может быть переключено от резервного источника на основе БИ и DC-преобразователя соответствующей мощности.

Экспериментальная часть проводилась на блоке БИ 18 В, 437 Ф. При этом исследовались распределение напряжения на ионисторах блока при заряде, изменение тока в БИ при разряде в режиме постоянной мощности нагрузки, длительность хранения заряда БИ. В процессе разряда напряжение БИ уменьшалось в диапазоне 18 – 10 В, определяемом для DC-преобразователя данного типа при стабильном выходном напряжении 27 В. В качестве примера на рис. 3 приведены графики изменения напряжения и тока в БИ в течение разряда через DC-преобразователь 27 В на нагрузку током 3 А.

На рис. 4 в качестве примера приведена зависимость времени поддержки электропитания нагрузок СЭС при напряжении 27 В от БИ 36 В, 218 Ф при токах до 4,0 А.

Важной характеристикой ионисторов является длительность хранения заряда в режиме саморазряда. В таблице приведены результаты исследования саморазряда БИ, заряженного по предлагаемому способу до 18,56 В при длительности хранения в течение 800 ч.

Из приведённой таблицы следует, что за один месяц уменьшение заряда БИ составило 3,7%.

**Выводы**

1. Предложенный способ заряда блока ионисторов К58-21-2,3В-3500Ф позволяет выравнять напряжение на отдельных элементах в процессе заряда и сохранять это качество от цикла к циклу



Рис. 2. Общий вид источника вторичного электропитания на основе БИ 18 В, 437 Ф из 8 шт. ионисторов К58-21-2,3В-3500Ф и DC-преобразователя 27 В серии MR160D-12WS-UM

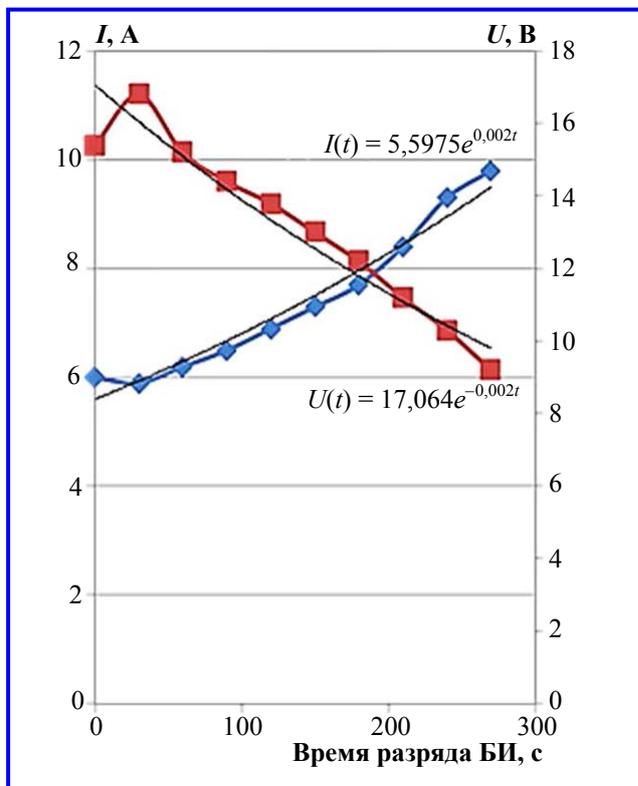


Рис. 3. Изменение тока и напряжения в БИ 18В, 437Ф при разряде через DC-преобразователь 27 В серии MR160D-12WS-UM на нагрузку током 3 А

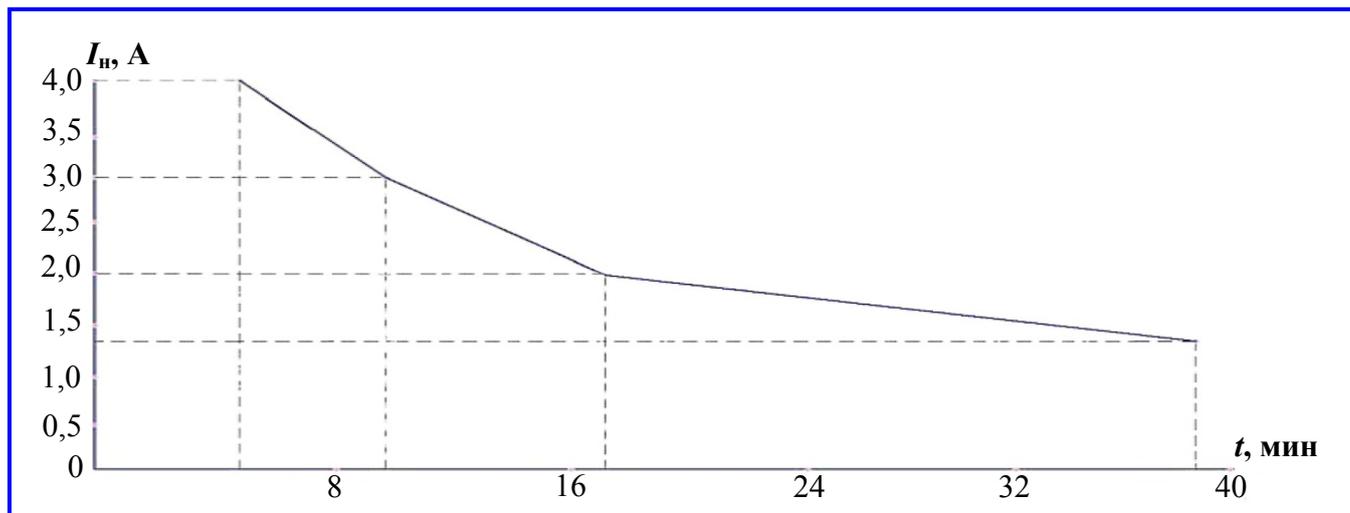


Рис. 4. Зависимость времени поддержки питания СЭС от БИ 36 В, 874 Ф через DC-преобразователь 27 В при различных токах нагрузки

Параметры элементов				Изменение напряжения (В) на элементах во времени, ч						
№	С, Ф	$I_{ут}$ , мА	$R$ , МОм	0	96	144	260	332	428	800
1	3402	2,7	3,0	2,31	2,29	2,28	2,26	2,26	2,26	2,24
2	3174	2,4	0,17	2,30	2,28	2,26	2,25	2,37	2,24	2,22
3	3233	0,2	14	2,31	2,28	2,26	2,25	2,24	2,24	2,22
4	3239	2,7	4,8	2,31	2,28	2,26	2,24	2,24	2,23	2,21
5	3603	3,2	2,5	2,30	2,28	2,27	2,25	2,24	2,23	2,21
6	2598	3,2	1,6	2,31	2,26	2,24	2,22	2,21	2,20	2,22
7	3250	0,08	9,2	2,30	2,26	2,24	2,22	2,22	2,21	2,19
8	4092	4,60	1,7	2,33	2,30	2,28	2,26	2,26	2,25	2,24
Напряжение БИ, В				18,56	18,38	18,27	18,13	18,08	18,02	17,87

без применения способов активного или пассивного выравнивания напряжений.

2. Исключение перенапряжений на отдельных элементах блока ионисторов при заряде обеспечивает повышение надёжности системы энергоснабжения.

3. Источники электропитания на основе БИ и DC-преобразователей рекомендуется использовать в качестве резерва питания нагрузок СЭС.

### Литература

1. Кузнецов В. П., Панькина О. С., Мачковская Н. И. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы) :

разработка и производство / В. П. Кузнецов, О. С. Панькина, Н. И. Мачковская // Компоненты и технологии. – 2012.

2. Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic : физика, принцип работы, параметры / А. Панкрашкин // Компоненты и технологии. – 2006. – № 9.

3. Шурыгина В. Суперконденсаторы. Помощники или возможные конкуренты батарейным источникам питания // Электроника : Наука. Технология. Бизнес. – 2003. – № 3. – 20 с.

4. Способ заряда блока ионисторов и устройство для его осуществления. – Заявка на изобретение № 2013145662/07 от 04.10.13.

5. Пат. РФ № 2488198 Стабилизированный комбинированный источник электропитания. – Оpubл. 23 мая 2013 г.

Поступила в редакцию 04.06.2014

*Алексей Иванович Галушко, канд. техн. наук, начальник сектора.  
Юрий Иванович Гром, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник.  
Александр Николаевич Лазарев, начальник отдела.  
Геннадий Сергеевич Сергеев, начальник лаборатории.  
Т. (495) 994-53-23. E-mail: lazarev@istranet.ru.*