

УДК 620.92

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-105-115

Для цитирования: Перспективы применения комбинированного накопителя электроэнергии космического применения / А. И. Тишков, Ю. В. Коноплев, А. А. Юев и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 1. С. 105–115. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-105-115.

For citation: Tishkov A. I., Konoplev Yu. V., Yuev A. A., Koshelev P. E., Zakharov S. A. Prospects of application of the combined storage space application. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 1, P. 105–115. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-105-115.

Перспективы применения комбинированного накопителя электроэнергии космического применения*

А. И. Тишков¹, Ю. В. Коноплев, А. А. Юев, П. Е. Кошелев, С. А. Захаров

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

¹E-mail: tishko-sash@yandex.ru

Комбинированные системы накопления электроэнергии находят широкое применение в составе возобновляемых источников в промышленности, транспортной инфраструктуре, космической технике и других отраслях. Обусловлена подобная тенденция их более высокой надежностью и эффективностью, нежели чем у блоков питания из однотипных элементов, что, в частности, можно наблюдать на примере устройств космического назначения, где к элементам питания предъявляются повышенные требования к диапазону рабочих температур, а также к входным и выходным характеристикам.

В статье описывается разработка структуры портативного комбинированного накопителя электроэнергии на основе блока суперконденсаторов и аккумуляторов с системой контроля заряда и разряда, с масштабируемым (в зависимости от применяемых комплектующих) спектром входных характеристик и широким диапазоном рабочих температур. Представлена математическая модель комбинированного накопителя, разработанная в среде Simulink, позволяющая оценивать возможности работы предлагаемой структуры, анализируя различные режимы работы схемы. Подобное устройство может применяться в условиях крайне низких зарядных токов. Например, в случае затенения или неоптимальной пространственной ориентации солнечных панелей, литий-ионные аккумуляторы большой емкости не могут корректно заряжаться. Также к преимуществам комбинированных структур накопления электроэнергии можно отнести работоспособность в широком диапазоне температур, обеспеченную способностью суперконденсаторов сохранять заряд даже при низких температурах.

В статье проиллюстрирован облик печатного узла в виде 3D-модели, полученной при проектировании схемы устройства в САПР Altium Designer 17, прилагаются результаты исследований и тестирования на работоспособность физически реализованного комбинированного накопителя электроэнергии, подтверждающие его рабочие характеристики на примере одного из составных модулей прототипа спутниковой платформы CubeSat, приводятся рекомендации по возможному применению подобных устройств и освещаются перспективы применения комбинированных накопителей в исполнительных элементах крупногабаритных трансформируемых конструкций.

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, аккумулятор, суперконденсатор, система управления.

* Работа выполнена в организации ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020-045/2 на выполнение базовой части государственного задания «Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования»).

The work was carried out in BSTU “VOENMEH” with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (government contract agreement № 075-03-2020-045/2 of 09.06.2020).

Prospects of application of the combined storage space application

A. I. Tishkov¹, Yu. V. Konoplev, A. A. Yuev, P. E. Koshelev, S. A. Zakharov

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinova
1, 1 Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 190005, Russian Federation

¹E-mail: tishko-sash@yandex.ru

Combined energy storage systems are widely used as part of renewable sources in the manufacturing industry, transportation infrastructure, space engineering, and other industries. This trend is due to their higher reliability and efficiency than that of power supplies made of the same type of cells, which can be observed, in particular, in devices for space applications, where power cells are subject to higher requirements for the range of operating temperatures, as well as for input and output characteristics.

The article describes the development of the structure of a portable combined energy storage device based on a block of supercapacitors and batteries with a charge and discharge control system, with a scalable (based on the components used) spectrum of input characteristics and a wide range of operating temperatures. The authors presented a mathematical model of a combined energy storage device developed in the Simulink environment, which makes it possible to assess the performance capabilities of the proposed structure by analyzing the different modes of operation of the circuit. Such a device can be used in conditions of extremely low charging currents. For example, if the solar panels are shaded or their spatial orientation is sub-optimal, high-capacity lithium-ion batteries cannot be charged correctly. Also, the advantages of combined electricity storage structures include their operability over a wide temperature range thanks to the ability of supercapacitors to retain their charge even at low temperatures.

The article also shows the printed circuit assembly in the form of a 3D model obtained by designing the device circuit in Altium Designer 17 CAD; the results of research and performance testing of a physically implemented combined energy storage device are shown, which confirm its performance characteristics on the example of one of the component modules of the prototype satellite platform CubeSat; the article also provides recommendations for the possible application of such devices and highlights prospects for the application of combined energy storage devices in actuating elements of large flexible spacecraft.

Keyword: energy storage, battery, supercapacitor, control system.

Введение

Система электроснабжения является одной из главных составляющих обеспечения работы бортовой системы космического аппарата (КА). Как правило, она состоит из систем преобразования, распределения, первичных и вторичных источников электроэнергии. В настоящее время из химических источников тока широкое применение получили гальванические, к которым относят батареи одноразового применения, используемые в КА и рассчитанные на небольшой срок службы, а также аккумуляторы, предназначенные для продолжительного электропитания модулей и заряжаемые от фотопреобразователей [1; 2]. В сравнении с современными гальваническими источниками тока, суперконденсаторы имеют широкий диапазон рабочих температур, способны накапливать электроэнергию малыми и большими токами без использования контроллера заряда, отдавать большую мощность в полезную нагрузку за короткий промежуток времени [3]. Однако, из-за малой емкости и большого тока утечки, суперконденсаторы не применяют для длительного хранения электроэнергии. Схемотехнически объединяя разные емкостные источники, представляется возможным использовать несколько преимуществ от каждого из видов.

Структура комбинированного накопителя электроэнергии

Одним из технических решений для корректного накопления электроэнергии являются комбинированные схемы, состоящие из блоков суперконденсаторов, блоков аккумуляторов и необходимой электронной периферии [4]. Предлагаемое устройство может использоваться для зарядки аккумуляторов КА от различных источников малого тока, что находит применение, например, в случае питания исполнительных модулей космического аппарата от солнечных

панелей, где возможно частичное затенение (затенения могут носить систематический характер) эффективной площади или деградация фотопреобразовательных элементов с последующим падением мощности [5]. Структура одного из возможных вариантов исполнения схемы комбинированного накопителя приведена на рис. 1.

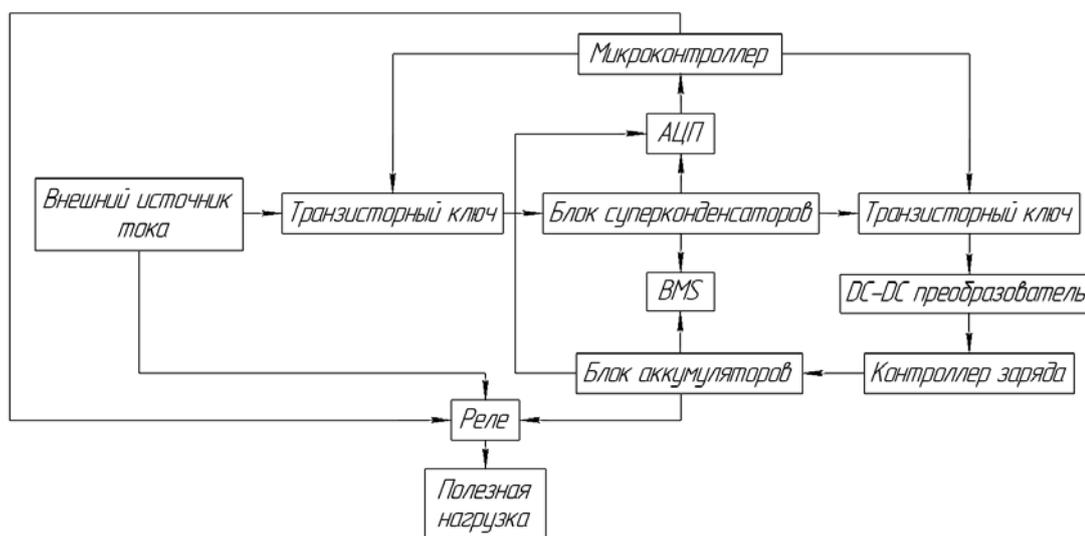


Рис. 1. Структурная схема комбинированного накопителя электроэнергии

Fig. 1. Structure diagram of a combined energy storage electrical energy

Принцип работы схемы заключается в следующем: зарядка начинается с накопления электроэнергии блоком последовательно соединённых суперконденсаторов от внешнего источника тока до требуемого напряжения, после чего происходит раскоммутация цепи внешнего источника тока от блока суперконденсаторов; далее, происходит зарядка блока аккумуляторов от суперконденсаторов через промежуточный DC-DC преобразователь и контроллер заряда, необходимый для обеспечения оптимального метода заряда аккумуляторов [6; 7]. Так как емкость ионисторов значительно меньше аккумуляторов, зарядка носит циклический характер до тех пор, пока на аккумуляторах не будет достигнуто требуемое напряжение или уровень заряда. Питание нагрузки осуществляется непосредственно от блока аккумуляторов либо через внешний источник тока, где для переключения между двумя источниками питания применяется реле, состояние которого задается микроконтроллером. Управление зарядкой осуществляется транзисторами, работающими в ключевом режиме и осуществляющими коммутацию цепи между аккумулятором, суперконденсатором и внешнем источником тока. Управление транзисторами и реле осуществляется через микроконтроллер. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) используется для мониторинга напряжений на одном аккумуляторе и суперконденсаторе, с последующей передачей информации на микроконтроллер.

Сохранение работоспособности и обеспечение максимального срока службы блока последовательно соединенных накопителей, возможно только при обеспечении постоянного мониторинга и контроля состояния каждой ячейки [8; 9]. Для решения данной проблемы применяются системы балансировки (рис. 2), которые позволяют поддерживать необходимое значение напряжения и емкости на отдельных элементах. На данный момент существует два основных вида балансировки – пассивная и активная, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Пассивная вариация отличается своей простотой: разряд батареек, требующих балансировки, осуществляют посредством байпасных цепей (режим питания нагрузки сетевым напряжением в обход основной схемы системы), обеспечивающих рассеивание мощности об постоянное сопротивление. Подобные цепи могут находиться в аккумуляторном блоке либо располагаться во внешней плате. Почти вся излишняя энергия от элементов с повышенным зарядом

превращается в тепло, и это является основным недостатком пассивной методики, ведь происходит сокращение времени работы АКБ без подзарядки.

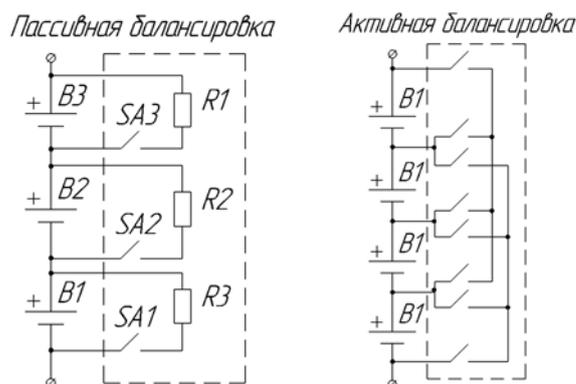


Рис. 2. Пассивная и активная балансировка

Fig. 2. Passive and active balancing

Активный метод лучше с точки зрения сохранения уже накопленной энергии на ячейке. Метод заключается в передаче энергии от батарей с большим зарядом к менее заряженным батареям, используются индуктивности, транзисторы, емкости и DC-DC преобразователи, потери энергии в которых незначительны. Этому методу уместно отдавать предпочтение в тех случаях, когда есть потребность в обеспечении максимального времени функционирования аккумулятора без подзарядки. Недостатком такой схемы является её дороговизна [10; 11].

Математическая модель комбинированного накопителя электроэнергии

По структурной схеме (рис. 3) собрана математическая (компьютерная) модель комбинированного накопителя в среде Simulink для оценки возможности работы предлагаемой структуры, а также для анализа и исследования при различных режимах работы [12].

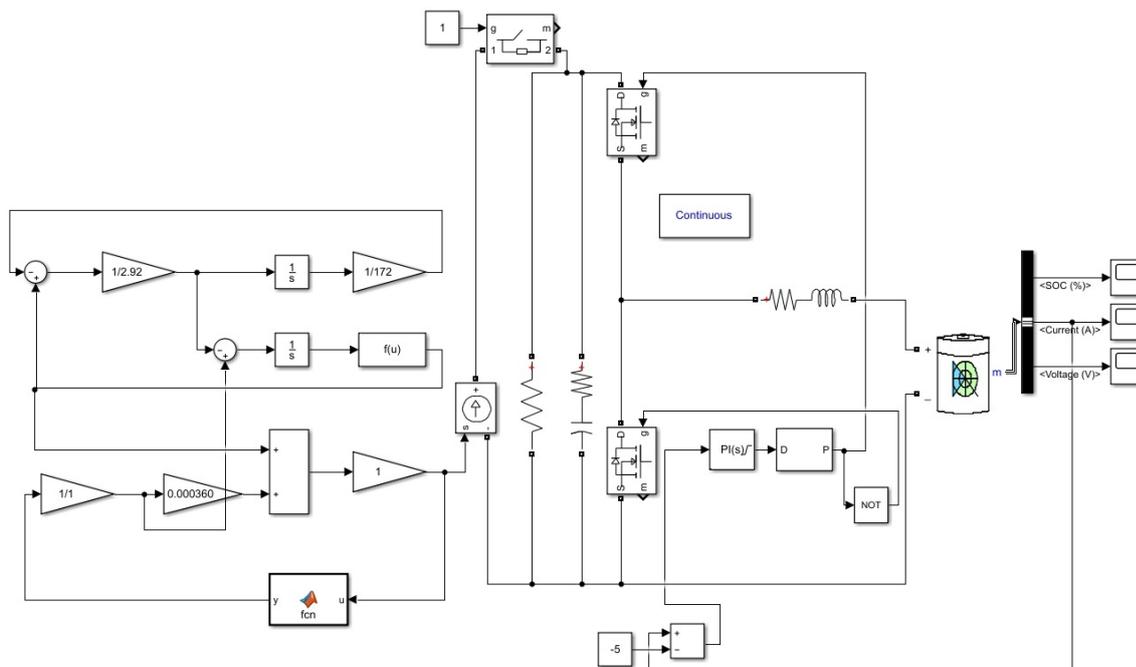


Рис. 3. Математическая модель комбинированного накопителя электроэнергии

Fig. 3. Mathematical model of the combined storage electrical energy

Математическая модель комбинированного накопителя электроэнергии включает в себя модели суперконденсатора, зарядного устройства, литий-ионного аккумулятора и микроконтроллера, управляющего зарядкой комбинированного накопителя.

Модель суперконденсатора содержит два ветви, состоящие из конденсаторов и резисторов, – медленную и главную, соединенные параллельно (рис. 4). Таким образом, напряжение на них всегда одинаковое, а токи проходят между собой пропорционально резисторам R_1 , R_2 и R_f , чтобы учесть потери [13].

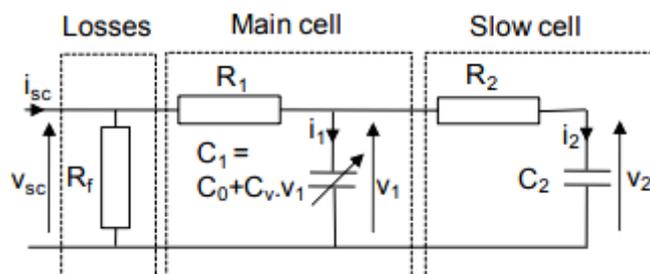


Рис. 4. Двухветочная схема модели суперконденсатора

Fig. 4. Two branches model of a supercapacitor

На рис. 4 v_1 и v_2 – это напряжения на конденсаторах; C_1 и C_2 – емкости главного и медленно-го конденсатора соответственно.

Для вычисления составляющих данной модели необходимы характеристики реального суперконденсатора, такие как емкость, напряжение и внутреннее сопротивление.

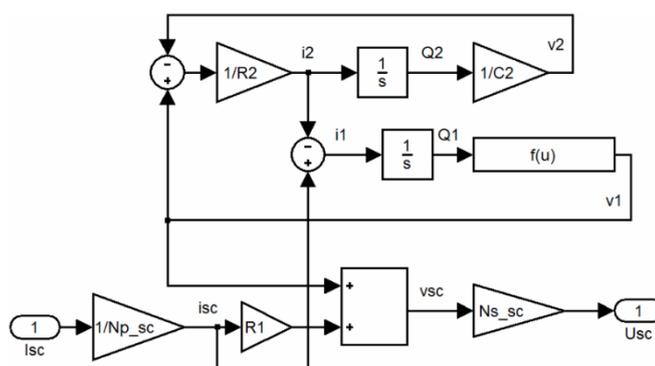


Рис. 5. Математическая модель суперконденсатора

Fig. 5. Mathematical model of a supercapacitor

Вход математической модели (рис. 5) соединен с программируемым блоком, который задаёт как ток на входе суперконденсатора, так и метод зарядки для различных режимов. Первый элемент на входе суперконденсатора – множитель. Его значение зависит от количества соединенных параллельно конденсаторов. Ток, поступающий на вход модели суперконденсатора, разделяется между всеми элементами. Формула коэффициента

$$K = 1 / N_{p_sc} \tag{1}$$

где N_{p_sc} – количество параллельно соединенных ячеек.

На выходе данного элемента получается значение тока на каждой ячейке блока суперконденсаторов.

Для того чтобы получить на выходе напряжение, в главном суперконденсаторе осуществляется умножение значения тока на входе с сопротивлением R_1 . Однако это лишь напряжение

на входе суперконденсаторов, соединённых параллельно, а для ячеек, соединённых последовательно, выходное значение умножается на N_{s_sc} , где N_{s_sc} – это количество последовательно соединённых суперконденсаторов. Таким образом, напряжение суперконденсатора высчитывается из формулы (2):

$$U_{sc} = N_{s_sc} v_{sc} = N_{s_sc} (v_1 + R_1 i_{sc}) = N_{s_sc} \left(v_1 + R_1 \frac{I_{sc}}{N_{p_sc}} \right), \quad (2)$$

где v_{sc} и i_{sc} – напряжение и ток каждого отдельного суперконденсатора; N_{s_sc} – количество последовательно соединённых ячеек; v_1, v_2, i_1, i_2 – величины напряжения и тока, приведенные на рис. 5;

$$i_2 = \frac{1}{R_2} (v_2 - v_1), \quad (3)$$

$$v_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{C_2} \int \frac{1}{R_2} (v_1 - v_2) dt. \quad (4)$$

Заряд, который получает C_2 в каждый момент времени можно получить по формуле

$$Q_2 = \int i_2 dt. \quad (5)$$

Значение интегрируется i_2 при помощи соответствующего элемента системы Simulink, после чего домножается на $1/C_2$ для того чтобы получить значение v_2 .

$$i_1 = i_{sc} - i_2. \quad (6)$$

Отсюда ток в медленной ячейке выражается по формуле

$$i_1 = C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} = (C_0 + C_v v_1) \frac{dv_1}{dt}, \quad (7)$$

$$Q_1 = C_0 v_1 + \frac{1}{2} C_v v_1^2. \quad (8)$$

Напряжение на медленной ячейке определяется выражением

$$v_1 = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 2C_v Q_1}}{C_v}. \quad (9)$$

Реализация первой ветви с помощью пакета Simulink происходит следующим образом: на входе имеется значение i_1 (формула), после чего оно интегрируется по аналогии со второй ветвью. Получив на выходе значение Q_1 , оно подается на вход функции $f(u)$, которая является формулой. Все значения, кроме Q_1 , в этой формуле постоянны для каждого отдельного суперконденсатора. Таким образом, имея значение v_1 , представляется возможным вернуться к вычислению напряжения на выходе батареи суперконденсаторов. v_1 – значение напряжения без учета текущей итерации заряда.

После сложения напряжений v_1 и напряжения заряда v_{sc} , на выходе получается напряжение на каждой системе суперконденсаторов, соединённых параллельно, при умножении которого на количество систем определяется значение заряда. Для ограничения и контроля заряда используется блок функции, на котором с помощью программного кода задаются условия, ограничения напряжения и значения входного тока как для зарядки, так и для разрядки суперконденсатора.

На основании результатов моделирования (рис. б), можно сделать вывод о работоспособности математической модели. При зарядке блока суперконденсаторов происходит пауза: аккумулятор не заряжается. В случае разрядки суперконденсаторов, проходит зарядка модели аккумулятора.

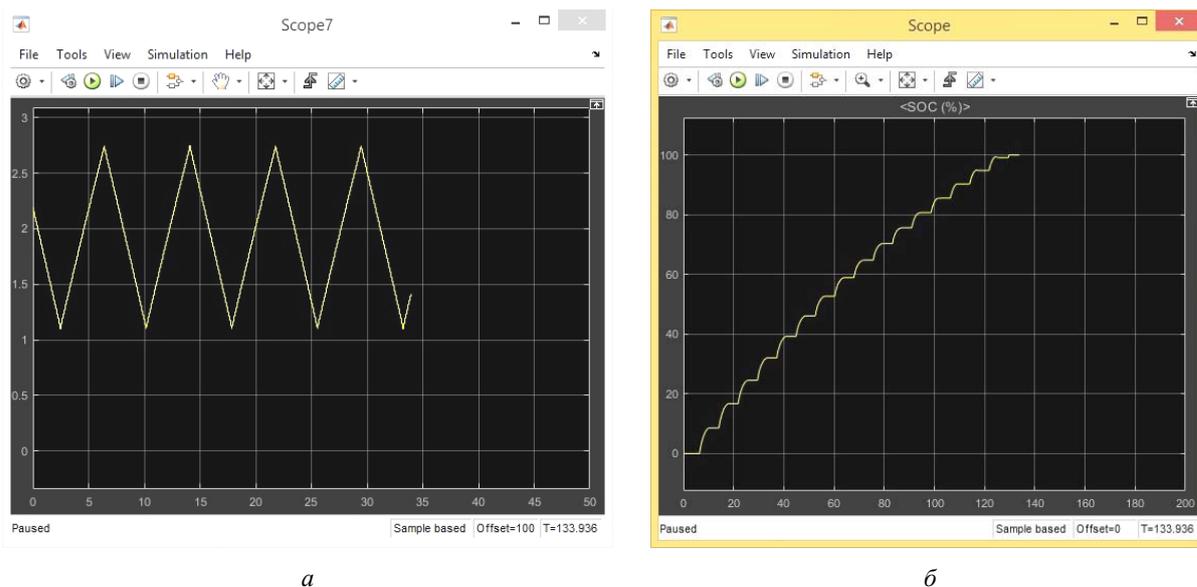


Рис. 6. Циклическая зарядка суперконденсатора от внешнего источника тока с последующей передачей накопленной электроэнергии в аккумулятор (а).
Циклическая зарядка аккумулятора от суперконденсатора (б)

Fig. 6. Cyclic charging of the supercapacitor from an external current source, with subsequent transfer of the accumulated electrical energy to the battery (a).
Cyclic charging of the accumulator from the supercapacitor (b)

Применение комбинированного накопителя электроэнергии

В настоящее время стремительно развиваются малые космические аппараты (МКА), способные выполнять различные задачи: от учебных и исследовательских целей до связи и наблюдения. Одной из проблем, существующих в данной области, являются системы электроснабжения – малые спутники не могут нести накопители электроэнергии большого объема, что приводит к их большой зависимости от постоянной подзарядки с помощью солнечных панелей и строгой экономии заряда.

Одним из примеров применения комбинированного накопителя электроэнергии можно привести выполненную в БГТУ «ВОЕНМЕХ» работу, где был спроектирован и разработан прототип комбинированного накопителя электроэнергии на основе четырех последовательно соединенных суперконденсаторов и двух последовательно соединенных литий-полимерных аккумуляторов (рис. 7).

В составе прототипа спутника типа CubeSat для учебных целей комбинированный накопитель приведен на рис. 8. Одной из задач является эксперимент работы прототипа в реальных условиях.

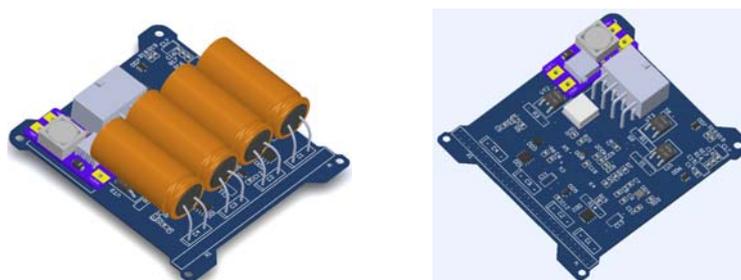


Рис. 7. 3D-модель прототипа печатного узла комбинированного накопителя

Fig. 7. 3D model of a prototype printed circuit board of a combined storage

Разработанный накопитель электроэнергии в составе спутника CubeSat может заряжаться малыми токами от солнечных батарей с последующей передачей электроэнергии на аккумуляторы для обеспечения питания нагрузки (в виде сервоприводов).

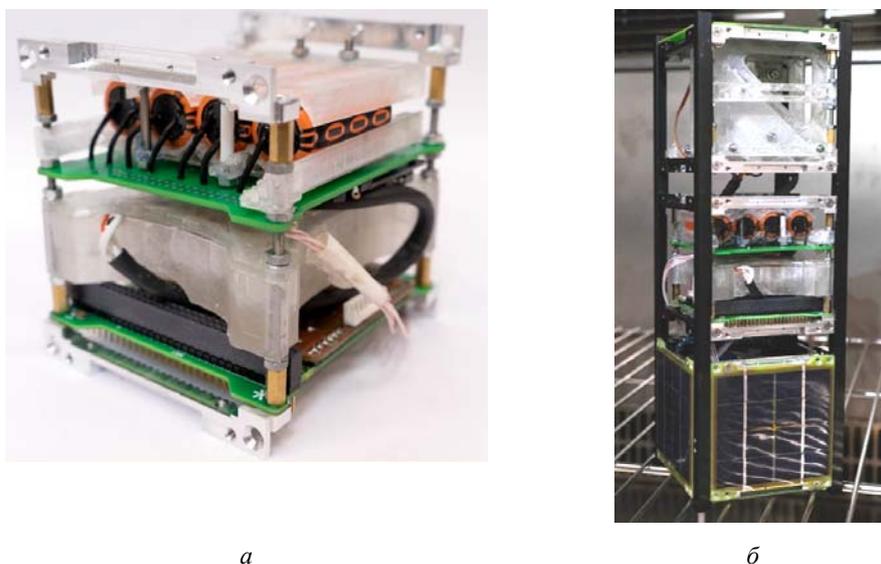


Рис. 8. Печатный узел комбинированного накопителя (а);
накопитель в составе спутника CubeSat (б)

Fig. 8. Printed circuit board of the combined storage (a);
the storage as part of the CubeSat (b)

Изготовленный прототип комбинированного накопителя электроэнергии обладает характеристиками, представленными в таблице. Изделие способно заряжаться напряжением до 11,2 В и малыми токами.

Характеристики прототипа комбинированного накопителя электроэнергии

Физическая величина	Числовое значение	Единицы измерения
Входное напряжение	до 11,2	В
Входной ток	до 3	А
Выходное напряжение	от 7 до 8,4	В
Выходной ток	до 1,5	А
Масса	~320	г
Габариты	85×93×50	мм
Суммарная емкость	1500	мА·ч

В качестве другого примера применения можно привести ещё одну работу в БГТУ «ВОЕНМЕХ», где в рамках выполнения ПНИ велась разработка системы управления формой радиотражающего сетеполотна крупногабаритной трансформируемой конструкции (КТК) (рис. 9). Исполнительные устройства, входившие в эту систему, получали энергию через открытый оптический канал. При использовании этого метода ток зарядки были достаточно мал и существовала проблема накопления энергии на аккумуляторах. Для решения описанной проблемы, рассматривалось использование комбинированного накопителя электроэнергии, который, благодаря своим характеристикам, был способен заряжаться от малых токов [14; 15].



Рис. 9. Применение комбинированного накопителя в КТК

Fig. 9. The use of a combined storage in large-sized transformable constructions

Заключение

Комбинированные накопители могут найти свое применение в качестве резервного источника питания в космических аппаратах, в частности, в сфере малых космических аппаратов, где могут применяться для зарядки аккумуляторов системы от источников малых токов, например, при некорректно ориентированных солнечных панелях. Также возможно применение в системах управления формой крупногабаритных трансформируемых конструкций, где комбинированные накопители могут служить для питания исполнительных устройств, заряжаясь беспроводным способом от фотопреобразователей.

Авторами планируется исследование возможностей зарядки комбинированных накопителей от малошумящих лазеров систем передачи информации по открытому оптическому каналу.

Библиографические ссылки

1. Рентюк В. Системы питания и перспективы использования GaN в космических аппаратах // Силовая электроника, 2019. № 6. С. 20–26.
2. Коровина Н. В., Скундина А. М. Химические источники тока : справочник. 2003. 704 с.
3. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока. Элементы и аккумуляторы оборудования для испытаний и эксплуатации, 2005. 264 с.
4. Применение ионисторов в комбинированном аккумулировании энергии / К. Н. Виноградов, И. Я. Шестаков, А. А. Фадеев, Ц. Г. Надараиа // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. № 13. С. 373–374.
5. Носкин Г. В., Хаванов Е. С. Бесчастный Р. А. Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электропитания возвращаемых космических аппаратов // Лесной вестник. 2019. № 4. С. 39–48.
6. Патент на полезную модель № 194733 U1 Российская Федерация, МПК H02J 7/04. Накопитель электроэнергии полного диапазона входной мощности: № 2018145815 ; заявл. 24.12.2018 ; опубл. 20.12.2019 / А. И. Тишков, А. Д. Ширшов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ»).

7. Разработка комбинированного накопителя электроэнергии / А. И. Тишков, Ю. В. Коноплев, И. В. Шевцов, А. А. Юев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. № 2. С. 140–144.
8. PowerPump Balancing [Электронный ресурс]. URL: http://www.ti.com/lit/an/slua524b/slua524b.pdf?ts=1606312318354&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
9. Современные электрохимические системы аккумулирования энергии / Т. Л. Кулова, И. И. Николаев, В. Н., Фатеев А. Ш. Алиев // *Kimya Problemleri*. 2018. № 1. С. 9–34.
10. Рыкованов А. Системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // *Силовая электроника*. 2009. № 19. С. 52–55.
11. Сихуа У. Выработка заряда батареи занимает длительное время работы и продлевает срок службы. 2009. [Электронный ресурс]. URL: https://www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2009/09/TI_AAJ_1Q2009_3.pdf.
12. Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Н. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство // *Компоненты и Технологии*. 2005. № 50. С. 12–16.
13. Zubieta L. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications, M. A. Sc. thesis, Dep. Of Elect. and Comput. Eng., University of Toronto, Toronto, Ont., Canada, 1997. P. 173
14. Передача энергии и информации по оптическому каналу для управления формой космической антенны / Л. Б. Кочин, М. А. Крылова, Д. А. Хромихин и др. // *Решетневские чтения : материалы XXI междунар. науч. конф. Красноярск, 2017*. С. 129–130.
15. Организация энергоинформационного обмена между устройствами управления формой трансформируемой антенны с применением волоконно-оптических технологий / С. А. Матвеев, С. Ю. Страхов, Д. А. Хромихин и др. // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83, № 11. С. 73–78.

References

1. Rentiuk V. [Power supply systems and prospects of using GaN in spacecraft]. *Power Electronics*. 2019, No. 6, P. 20–26 (In Russ.).
2. Korovina N. V., Skundina A. M. *Chimicheskie istochniki toka* [Chemical current sources: Handbook]. 2003, 704 p.
3. Taganova A. A., Bubnov Y. I., Orlov S. B. *Germetichnie istochniki toka* [Sealed chemical current sources. Elements and accumulators of test and operating equipment], 2005. 264 p. (In Russ.)
4. Vinogradov K. N., Shestakov I. Y., Fadeev A. A., Nadaraia C. G. [Application of ionic cells in combined energy storage] *Aktualnie problemi aviacii i kosmonavtiki* 2017, No. 13, P. 373–374 (In Russ.)
5. Noskin G. V., Khavanov E. S. Beschastny R. A. [Hybrid electric energy storage device based on lithium-ion batteries and blocks of supercapacitor for power supply systems of returned spacecrafts]. *Forestry bulletin*. 2019, No. 4, P. 39–48 (In Russ.)
6. Tishkov A. I., Shirshov A. D. [Full input power range electricity accumulator]. Patent RF, no. 2018145815, 2019
7. Tishkov A. I., Konoplev Y. V., Yuev A. A., Shevtsov I. V. [Development of a combined electric power storage device] *Russian Aeronautics*. 2019, Vol. 62, No. 2, P. 321–325.
8. PowerPump Balancing. Available at: http://www.ti.com/lit/an/slua524b/slua524b.pdf?ts=1606312318354&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
9. Kulova T. L., Nikolaev I. I., Fateyev V. N., Aliev A. Sh. [Modern electrochemical energy storage systems] *Kimya Problemleri*. 2018, No. 1, P. 9–34 (In Russ.)
10. Rykanov A. [Li-ion battery balancing systems]. *Power Electronics*. 2009, No. 19, P. 52–55.
11. Xihua W. The battery charge takes a long time to run and prolongs battery life. 2009. Available at: https://www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2009/09/TI_AAJ_1Q2009_3.pdf.
12. Kuznetsov V., Pankina O., Machkovskaya N. [Condensers with double electric layer (ionic layer): development and production] *Components and Technologies*. 2005, No. 50, P. 12–16 (In Russ.).

13. Zubieta L. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications, *M. A. Sc. thesis, Dep. Of Elect. and Comput. Eng., University of Toronto, Toronto, Ont., Canada, 1997, 173 p.*

14. Kochin L. B., Krylova M. A., Khromikhin D. A., Shirshov A. D., Popylev V. G. [Energy and Information Transfer via Optical Channel for Shape Control of Space Antenna]. *Materiali XXI Megdunarodnoi nauchno-practicheskoi konferencii pamyati generalnogo konstruktora racetno-technicheskikh system akademika M. F. Reshetneva* [XXI Reshetnev Readings named after general designer of space system M. F. Reshetnev], Krasnoyarsk, 2017, P. 129–130 (In Russ.).

15. Matveev S. A., Strakhov S. Y., Khromikhin D. A. et al. [Organization of energy-information exchange between shape control devices of transformed antenna with application of fiber-optic technologies]. *Optical Journal*. 2016, Vol. 83, No. 11, P. 73–78 (In Russ.).

© Тишков А. И., Юев А. А., Захаров С. А.,
Коноплев Ю. В., Кошелев П. Е., 2022

Тишков Александр Игоревич – аспирант, младший научный сотрудник, инженер; Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова. E-mail: tishko-sash@yandex.ru.

Коноплев Юрий Вячеславович – аспирант, младший научный сотрудник, ассистент, инженер; Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова. E-mail: urzig_eastwood@mail.ru.

Юев Алексей Андреевич – аспирант, младший научный сотрудник, инженер; Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова. E-mail: betterthanjms@gmail.com.

Кошелев Павел Евгеньевич – магистрант, инженер; Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова. E-mail: switchcompany@yandex.ru.

Захаров Сергей Алексеевич – студент, техник; Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова. E-mail: sz11079812@mail.ru.

Tishkov Alexander Igorevich – PhD student, junior researcher, engineer; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinova. E-mail: tishko-sash@yandex.ru.

Konoplev Yuri Vyacheslavovich – PhD student, junior researcher, assistant professor, engineer; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinova. E-mail: urzig_eastwood@mail.ru.

Yuev Alexei Andreevich – PhD student, junior researcher, engineer; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinova. E-mail: betterthanjms@gmail.com.

Koshelev Pavel Evgenievich – Master’s Degree Student, engineer; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinova. E-mail: switchcompany@yandex.ru.

Zakharov Sergey Alexeyevich – student, technician; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinova. E-mail: sz11079812@mail.ru.
