

## ГИБРИДНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ И БЛОКОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗВРАЩАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г.В. Носкин, Е.С. Хаванов, Р.А. Бесчастный

ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

post@rsce.ru

Разработана структурная схема гибридного накопителя электрической энергии на основе литий-ионной аккумуляторной батареи и блока суперконденсаторов как дополнительного накопителя электрической энергии для обеспечения запитки пирсредств возвращаемого космического аппарата при спуске и посадке, сопровождающейся выдачей большой кратковременной мощности. В MATLAB/Simulink синтезирована имитационная математическая модель и проведена серия успешных тестов, для уточнения электрических параметров аккумуляторной батареи и суперконденсаторов с учетом максимальных требований по нагрузкам возвращаемых космических аппаратов. По результатам проведенных тестов уточнены электрические параметры аккумуляторной батареи и суперконденсаторов в составе гибридного накопителя. Рассчитаны удельная энергоемкость и удельная мощность гибридного накопителя применительно к системам электроснабжения перспективных возвращаемых космических аппаратов.

**Ключевые слова:** гибридный накопитель электрической энергии, возвращаемый космический аппарат, накопитель электрической энергии, литий-ионный аккумулятор, суперконденсатор, имитационная математическая модель

**Ссылка для цитирования:** Носкин Г.В., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 39–48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48

**Ц**елевые задачи современных и перспективных возвращаемых космических аппаратов (ВКА) постоянно усложняются, вызывая усложнение требований, предъявляемых ко всем узлам ВКА [1].

Одним из важнейших узлов ВКА является система электроснабжения (СЭС), состоящая из накопителей электрической энергии (НЭЭ), соединительных кабелей и различной аппаратуры управления [2, 3].

Система электроснабжения ВКА предназначена для хранения электрической энергии и эффективного обеспечения ею нагрузок ВКА с сохранением при заданном ресурсе высоких показателей надежности, живучести и безопасности [3].

Проектирование НЭЭ как основы системы электроснабжения ВКА в зависимости от сложности задач, должно опираться на следующие критерии [2, 3]:

- удельную энергоемкость, Вт·ч/кг;
- максимальную развиваемую мощность, Вт;
- удельную мощность, Вт/кг;
- безопасность, надежность и живучесть;
- температурный диапазон работы;
- многоразовость и унифицируемость применения [3].

До настоящего времени выполнить требования, в совокупности удовлетворяющие всем упомянутым критериям, не представлялось возможным, в связи с чем, было допущено их

ослабление, в частности, по менее значимым критериям: многоразовости и унифицируемости применения [1, 3, 4].

В настоящее время разработаны аккумуляторные батареи с высокими показателями удельной энергоемкости, поэтому задача проектирования унифицируемого многоразового НЭЭ, удовлетворяющего вышеупомянутым критериям для СЭС отечественных ВКА, подкрепляемая возможностью удешевления космических миссий и упрощения операций межполетного обслуживания, уже не является трудновыполнимой, однако при унификации проектируемый НЭЭ должен удовлетворять требованиям по нагрузкам как современных ВКА — КА «Союз» и ТГК «Прогресс», так и перспективных ВКА.

Перспективные ВКА обладают схожей с современными ВКА циклограммой работы, но имеют некоторое преимущество по нагрузкам, поэтому при проектировании унифицированного гибридного НЭЭ необходимо учесть, прежде всего, особенности перспективных ВКА.

Одной из особенностей перспективных ВКА, заслуживающей особого внимания, является необходимость обеспечения средствами СЭС импульсных нагрузок большой мощности на фоне непрерывного электропитания стационарной нагрузки перспективных ВКА. Такой режим вызван необходимостью подрыва большого количества

пиросредств спуска и посадки перспективных ВКА и является критическим для любого НЭЭ. Это требует неотложного решения.

### Цель работы

Целью настоящей работы является разработка схемы гибридного НЭЭ на основе литий-ионной батареи с феррофосфатным катодом и блоком суперконденсаторов для повышения общей удельной мощности накопителя [12], а на базе этой схемы — имитационной математической модели для проверки способности гибридного НЭЭ выполнить требования по нагрузкам как перспективных, так и современных ВКА на этапе спуска. Предполагается, что разработанный гибридный НЭЭ будет применяться как унифицированный на известных отечественных ВКА [1].

### Материалы и методы

**Оценка энергетических характеристик аккумулятора и блока суперконденсаторов.** Важнейшей характеристикой аккумуляторной батареи является эффективная энергия, которая представляет собой такое количество энергии, которое она гарантированно выдаст на постоянную внешнюю нагрузку  $R_{п.н}$  в интервале допустимых напряжений  $\Delta U_{а.б} = U_{\max а.б} - U_{\min а.б}$ .

Интервал допустимых напряжений определяется согласно особенностям работы бортовой аппаратуры ВКА.

Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи мало по сравнению с сопротивлениями внешних нагрузок ВКА, поэтому в данных расчетах было решено им пренебречь. Тогда при разряде на постоянную внешнюю нагрузку  $R_{п.н}$  ( $R_{п.н} \sim \text{constant}$ ) в течение времени  $\tau$  с минимальным допустимым напряжением  $U_{\min а.б}$  минимальная энергия может определяться выражением

$$W_{\min а.б} = \frac{\tau \cdot U_{\min а.б}^2}{R_{п.н}}. \quad (1)$$

При разряде на постоянную нагрузку  $R_{п.н}$  в течение времени  $\tau$  с максимальным допустимым напряжением  $U_{\max а.б}$  максимальная энергия определяется как

$$W_{\max а.б} = \frac{\tau \cdot U_{\max а.б}^2}{R_{п.н}}. \quad (2)$$

Исходя из формул (1) и (2), выражение для нахождения средней эффективной энергии для обеспечения питания постоянной нагрузки ВКА в интервале допустимых напряжений  $\Delta U_{а.б} = U_{\max а.б} - U_{\min а.б}$  будет иметь вид

$$W_{\text{ср.эф.а.б}} = \frac{\tau(U_{\max а.б}^2 - U_{\min а.б}^2)}{2R_{п.н}}. \quad (3)$$

Характеристикой, по которой можно оценить суперконденсатор, является его емкость [5]. При централизованном расположении блока суперконденсаторов (непосредственно в гибридном НЭЭ), его энергия на время импульса будет обеспечивать весь спектр нагрузок ВКА:

$$R_{\text{имп.н}} + R_{п.н}$$

Пусть интервал допустимых напряжений разряда блока суперконденсаторов

$$\Delta U_{б.с.к} = U_{\max б.с.к} - U_{\min б.с.к}$$

Если не использовать дополнительные устройства стабилизации выходного напряжения блока суперконденсаторов, необходимо увеличивать интервал допустимых напряжений по верхнему пределу, поэтому его целесообразно проектировать с  $U_{\max б.с.к} > U_{\max а.б}$ , и чем больше будет левая часть данного неравенства, тем больше времени будет обеспечиваться питанием нагрузка перспективного ВКА средствами блока суперконденсаторов [4].

Пусть в части обеспечения питания импульсной нагрузки ВКА необходимо обеспечить  $n$  последовательных импульсов, длительностью  $\tau$  с промежутком между импульсами  $T$ . Положим, что  $T \Rightarrow 0$ , тогда в пределе  $T \Rightarrow 0$  среднюю эффективную энергию блока суперконденсаторов можно быть представить выражением

$$W_{\text{сред.эф.б.с.к}} = \frac{\tau n (U_{\max б.с.к}^2 - U_{\min б.с.к}^2)}{2(R_{\text{имп.н}} + R_{п.н})}, \quad (4)$$

где условие  $T \Rightarrow 0$  позволяет максимально жестко задать требования к блоку суперконденсаторов и, что упрощает задачу, не рассматривать наблюдаемые на практике релаксирующие процессы в блоке суперконденсаторов между импульсами, объединить  $n$  импульсов в один импульс с длительностью  $\tau n$  [8].

В зависимости от требований в части нагрузок того или иного ВКА, блок суперконденсаторов следует собирать из разного количества отдельных ячеек. При расчете энергии блока, состоящего из  $k$  последовательно соединенных ячеек суперконденсаторов, учитывается, что

$$C_{б.с.к} = C_i / k, \quad U_{\text{общ. б.с.к}} = k U_{с.к}$$

где  $C_i$  и  $U_{с.к}$  — емкость и рабочее напряжение каждой отдельной ячейки суперконденсатора [15, 16].

С учетом максимального разрядного тока каждого суперконденсатора количество параллельных ветвей последовательных суперконденсаторов определится по формуле

$$P = \frac{I_{\max б.с.к}}{I_{\max C_i}}, \quad (5)$$

где  $P$  — количество параллельных ветвей (округляется вверх) из  $k$  последовательных суперконденсаторов;  $I_{\max б.с.к}$  — требуемый максимальный

ток блока суперконденсаторов;  $I_{\max C_i}$  — максимальный ток единичного суперконденсатора.

Эффективную емкость блока суперконденсаторов с учетом выражения (4) можно представить в виде

$$W_{\text{ср.эф.б.с.к}} = \frac{W_{\text{ср.эф.б.с.к}}}{U_{\text{макс б.с.к}}^2 - U_{\text{мин б.с.к}}^2} = \frac{\tau n}{2(R_{\text{имп.н}} + R_{\text{п.н}})}. \quad (6)$$

Поскольку кабельная сеть системы электропитания ВКА имеет ненулевые индуктивность и емкость, в ней не будет скачков напряжения при переходных процессах, обусловленных коммутациями узлов, поэтому было решено пренебречь завалами по фронтам импульса длительностью  $\tau n$  в вышеуказанных теоретических выкладках [4, 8, 13, 14]. Также не учитывались температурные эффекты аккумуляторных батарей и блока суперконденсаторов.

**Проект гибридного накопителя электрической энергии унифицированного для системы электроснабжения возвращаемого космического аппарата.** При проектировании гибридного НЭЭ, унифицированного для СЭС современных и перспективных ВКА, ставилась задача сочетания следующих качеств НЭЭ [2, 3]:

- многоразовости и унифицируемости;
- удельной энергоемкости, Вт·ч/кг;
- максимальной развиваемой мощности, Вт;
- удельной мощности, Вт/кг.

Разработана структурная схема гибридного НЭЭ (рис. 1), в основе которого заложены следующие основные блоки:

- аккумуляторная батарея;
- блок суперконденсаторов;
- блок управления коммутацией;
- блок телеметрии.

Блок управления коммутацией состоит из повышающего преобразователя напряжения с ограничителем тока, релейных переключателей и устройства обработки и преобразования внутренних данных, в котором из сигналов с датчиков блока суперконденсаторов и аккумуляторной батареи формируются команды для обеспечения своевременных переключений на внутренние релейные переключатели гибридного НЭЭ, которые в свою очередь могут быть и в полупроводниковом исполнении [4].

В состав блока телеметрии входят датчики тока, напряжения и температуры в гибридном НЭЭ (на структурной схеме они обозначены отдельными блоками: ТЕМП, ДНБСК, ДТБСК, ДНАБ, ДТАБ, ДНВЫХ, ДТВЫХ, см. рис. 1).

**Инициация импульсной нагрузки ПВКА средствами БСК.** Включение запитки импульсной нагрузки ВКА (см. рис. 1) от силовых шин (23) осуществляется командой по ветви (1). При этом данная команда через командный вывод (15)

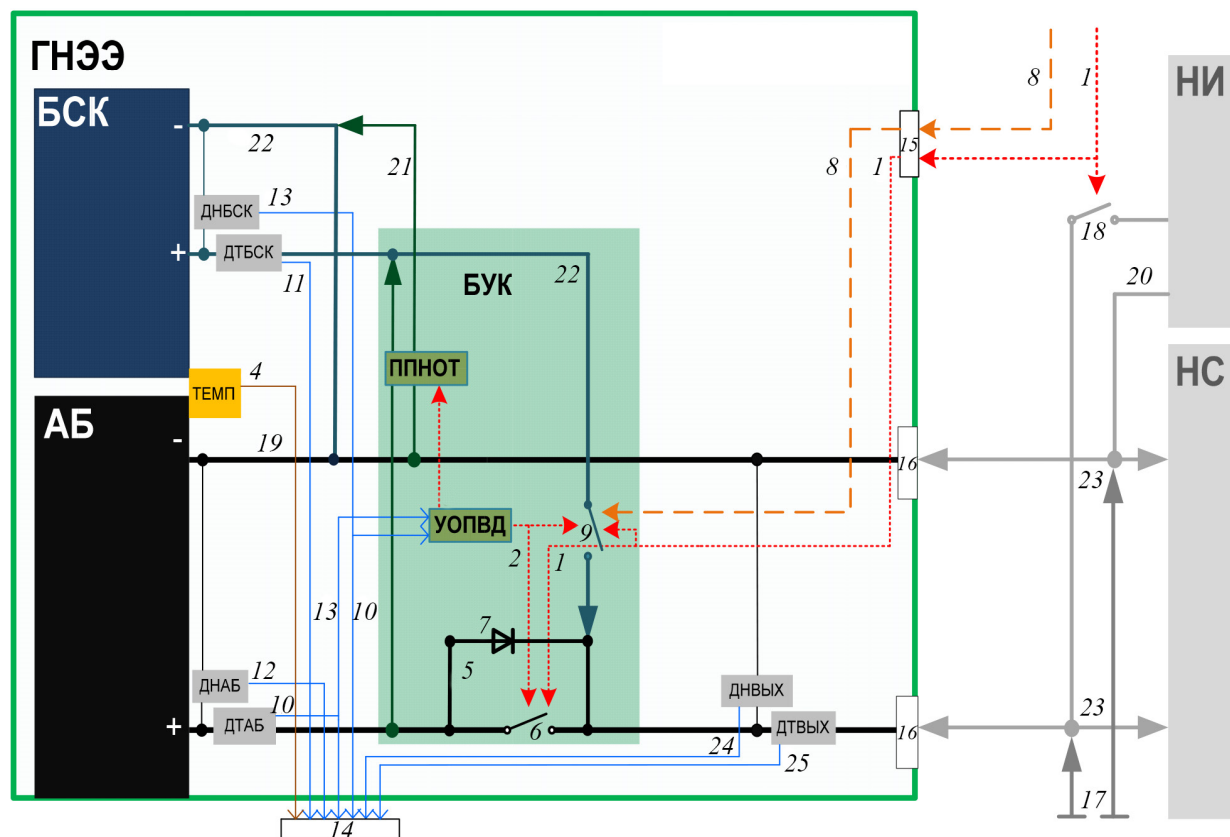
гибридного НЭЭ передается в блок управления и коммутации гибридного НЭЭ, где размыкает (6) и замыкает (9) ключ на время длительности команды. Дублирующим аналогом команды по ветви (1) является внутренняя команда по ветви (2) из УОПВД блока управления и коммутации. Данная команда генерируется в УОПВД при превышении величины тока на силовой шине от аккумуляторной батареи (19). Величина критического тока уточняется при проектировании гибридного НЭЭ.

Для предотвращения питания внутренней нагрузки гибридного НЭЭ средствами блока суперконденсаторов на силовой шине предусмотрен обводной канал (5) с блоком диодов (7), который необходим для предотвращения замыкания гальванической связи аккумуляторной батареи и нагрузки во время работы блока суперконденсаторов. Диодный блок (26) необходим для предотвращения передачи энергии от блока суперконденсаторов на блок ППНОТ в составе блока управления и коммутации гибридного НЭЭ. После того как напряжение на блоке суперконденсаторов при питании внешней нагрузки упадет ниже напряжения аккумуляторной батареи, обеспечение питания внешней нагрузки она снова возьмет на себя. Дублирующая команда по ветви (1) команда по ветви (2) может иметь некоторое запаздывание, величина которого обратно пропорциональна быстродействию УОПВД.

Заряд блока суперконденсаторов осуществляется по команде из УОПВД по ветви (3) в повышающий преобразователь напряжения с ограничителем тока (ППНОТ), в котором начинает работать схема с широтно-импульсным модулятором, повышающим входное напряжение с шин (19) до максимального напряжения блока суперконденсаторов. Команда по ветви (3) инициируется в УОПВД при поступлении в него сигнала с датчика напряжения (ДНБСК) по ветви (13) о значении ниже максимального. Внешняя команда по ветви (8) обеспечивает замыкание ключа (9) в гибридном НЭЭ, что при наличии на шинах (17) стабилизированного напряжения более 30 В может обеспечить заряд блока суперконденсаторов по шинам (22) от шин дополнительного питания (17). Под дополнительным питанием понимается энергия солнечных батарей и прочих НЭЭ космического аппарата.

В режиме инициации импульсной нагрузки ВКА при падении напряжения на блоке суперконденсаторов можно реализовать режимы запрета/разрешения заряда, но целесообразность того или иного пути необходимо подтвердить при математическом моделировании.

Коэффициент полезного действия составных частей гибридного НЭЭ должен составлять не менее 0,9.



**Рис. 1.** Принципиальная схема гибридного накопителя электрической энергии в составе возвращаемого космического аппарата: ГНЭЭ — гибридный накопитель электрической энергии; АБ — аккумуляторная батарея; БСК — блок суперконденсаторов; НС — нагрузка стационарная; НИ — нагрузка импульсная; БУК — блок управления и коммутации; УОПВД — устройство обработки и преобразования внутренних данных; ППНОТ — повышающий преобразователь напряжения с ограничителем тока; ДТБСК — датчик тока БСК; ДНБСК — датчик напряжения БСК; ДТАБ — датчик тока АБ; ДНАБ — датчик напряжения АБ; ДНВЫХ — датчик напряжения на выходе; ДТВЫХ — датчик тока на выходе; 1–3, 8 — ветви команд; 4, 10–13 — каналы на телеметрию с аккумуляторной батареей и блоком суперконденсаторов; 5 — обходной канал; 6 — ключ разъема; 7 — блок диодов; 9, 18 — ключ; 14 — телеметрический вывод гибридного НЭЭ; 15 — командный вывод; 16 — силовые выводы гибридного НЭЭ; 17 — дополнительное питание ВКА (в орбитальном полете — от солнечных батарей и дополнительных НЭЭ космического аппарата); 19 — силовая шина; 20 — шина питания импульсной нагрузки ВКА; 21 — шина блока суперконденсаторов в гибридном НЭЭ; 22 — шины; 23 — шина питания стационарной нагрузки ВКА; 24, 25 — каналы на телеметрию с силовой шиной (19) в гибридном НЭЭ; 26 — диодный блок

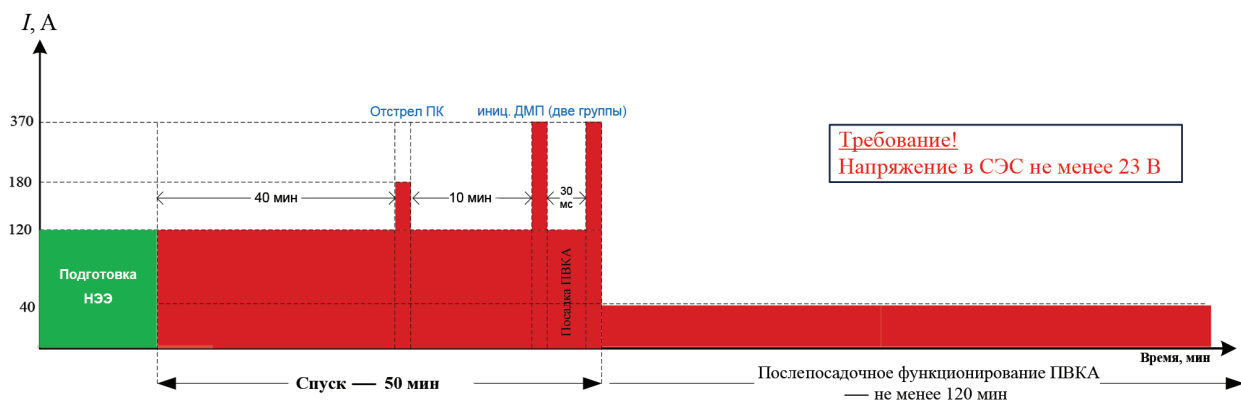
**Fig. 1.** Schematic diagram of a hybrid electric energy storage unit as part of a return spacecraft: ГНЭЭ — a hybrid electric energy storage device; АБ — rechargeable battery; БСК — block of supercapacitors; НС — stationary load; НИ — impulse load; БУК — control and switching unit; УОПВД — device for processing and converting internal data; ППНОТ — step-up voltage converter with current limiter; ДТБСК — current sensor БСК; ДНБСК — voltage sensor БСК; ДТАБ — current sensor АБ; ДНАБ — voltage sensor АБ; ДНВЫХ — output voltage sensor; ДТВЫХ — current output sensor; 1–3, 8 — branches of teams; 4, 10–13 — channels for telemetry with a battery and a block of supercapacitors; 5 — bypass channel; 6 — connector key; 7 — block of diodes; 9, 18 — key; 14 — telemetric conclusion hybrid NEE; 15 — command output; 16 — power conclusions hybrid NEE; 17 — additional power supply of the spacecraft (in orbital flight — from solar panels and additional EE of the spacecraft); 19 — power bus; 20 — power bus pulse load PBS; 21 — bus block supercapacitors in a hybrid EES; 22 — tires; 23 — power bus stationary load VKA; 24, 25 — channels for telemetry from the power bus (19) in a hybrid EES; 26 — diode block

Волоконная брэгговская решетка гибридного НЭЭ должна быть не менее 0,999.

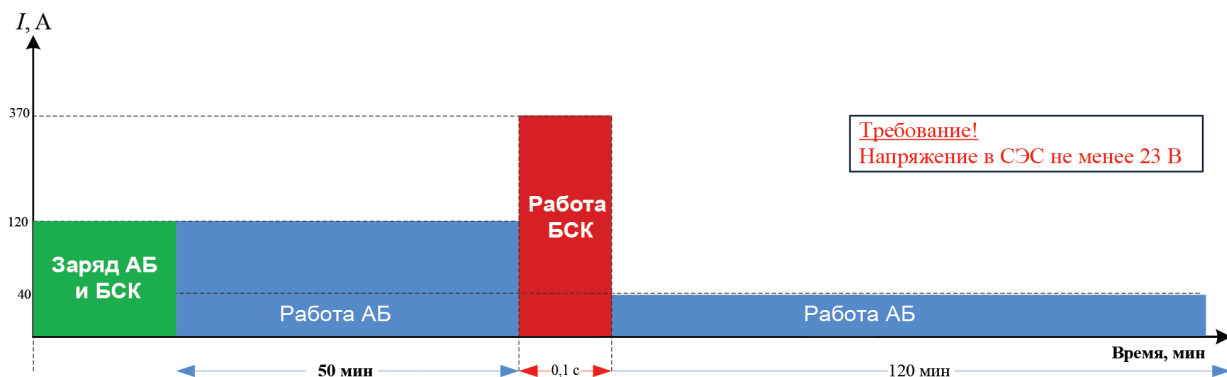
**Оценка нагрузок перспективного возвращаемого космического аппарата.** Среди отечественных ВКА самые большие стационарные и импульсные, нагрузки, как упоминалось ранее, имеет перспективный ВКА, поэтому проектирование унифицируемого гибридного НЭЭ было решено проводить с учетом удовлетворения требований

циклограммы (рис. 2): послепосадочный режим работы (от 500 до 900 Вт) должен проходить в непрерывном режиме до 120 мин, и импульсном — до 48 ч; послепосадочное функционирование перспективного ВКА — не менее 120 мин.

**Аккумуляторная батарея и блок суперконденсаторов для гибридного накопителя электрической энергии.** Изначально в основе гибридного НЭЭ предполагалось использование



**Рис. 2.** Циклограмма нагрузок перспективного возвращаемого космического аппарата (ПВКА) при выполнении этапа спуска после посадочного функционирования (длительность каждого импульса не более 30 мс): ПК — парашютный контейнер; ДМП — двигатели мягкой посадки  
**Fig. 2.** The cycle diagram of the loads of the prospective return spacecraft during the descent phase after landing operation (the duration of each pulse is not more than 30 ms): ПК — parachute container; ДМП — soft landing engines



**Рис. 3.** Испытательная циклограмма нагрузок для математической модели системы электроснабжения перспективного возвращаемого космического аппарата на основе гибридного накопителя электрической энергии: АБ — аккумуляторная батарея; БСК — блок суперконденсаторов  
**Fig. 3.** Test load sequence diagram for a mathematical model of a power supply system for a prospective returning spacecraft based on a hybrid electric energy storage device: АБ — rechargeable battery; БСК — block of supercapacitors

одноразовой батареи с высокой удельной энергоемкостью на основе литий-тионил-хлоридной электрохимии [1]. Но, к сожалению, одноразовая батарея является первичным источником электрической энергии и не может быть использована для перезаряжаемого унифицированного гибридного НЭЭ. После длительного анализа современных НЭЭ выбор пал на литий-ионные аккумуляторы с феррофосфатным катодом [6, 12]:

Емкость не менее, А·ч	135
Катодный материал	LiFePO <sub>4</sub>
Удельная энергоемкость, не менее, Вт·ч/кг	150
Допустимые токи заряд/разряд, А	90/100
Максимальное напряжение (НРЦ), В	3,7
Минимальное напряжение, В	2,5
Саморазряд за 2 мес, %	0,5
Количество циклов при 100 %-ной глубине разряда, не менее	3000

Диапазон рабочих температур, °С ..... от 0 до +60  
 Срок службы, не менее, лет ..... 15

Как указано выше, блок суперконденсаторов следует собирать из *k* последовательных суперконденсаторов для набора необходимого максимального напряжения и из *П* — параллельных ветвей с данными суперконденсаторами (4).

**Параметры для математического моделирования системы электроснабжения перспективного возвращаемого космического аппарата на основе гибридного накопителя электрической энергии.** Для разработки имитационной математической модели системы электроснабжения перспективного возвращаемого космического аппарата на основе гибридного НЭЭ с учетом предварительных теоретических оценок циклограмма (см. рис. 2) была сведена к испытательной циклограмме (рис. 3).

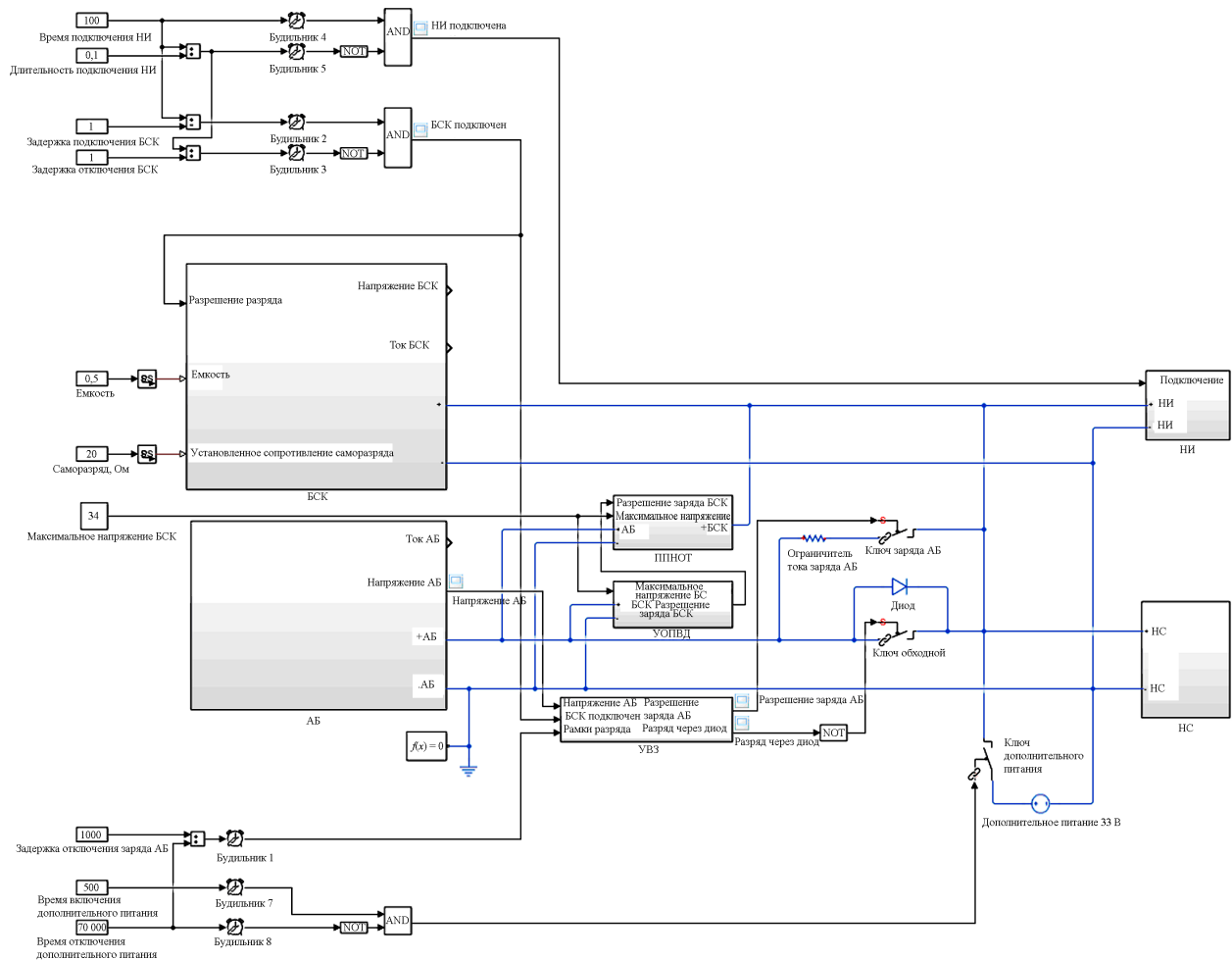


Рис. 4. Образец математической модели системы электроснабжения перспективного возвращаемого космического аппарата на основе схемы гибридного накопителя электрической энергии в MATLAB/Simulink (см. рис. 1)

Fig. 4. A sample of a mathematical model of the power supply system of a promising returning spacecraft based on a hybrid electric energy storage circuit in MATLAB / Simulink (see Fig. 1)

Основные входные параметры для имитационной математической модели, согласно некоторым данным по нагрузкам перспективного ВКА (эквивалентные сопротивления) и вышеуказанным оценкам [13]:

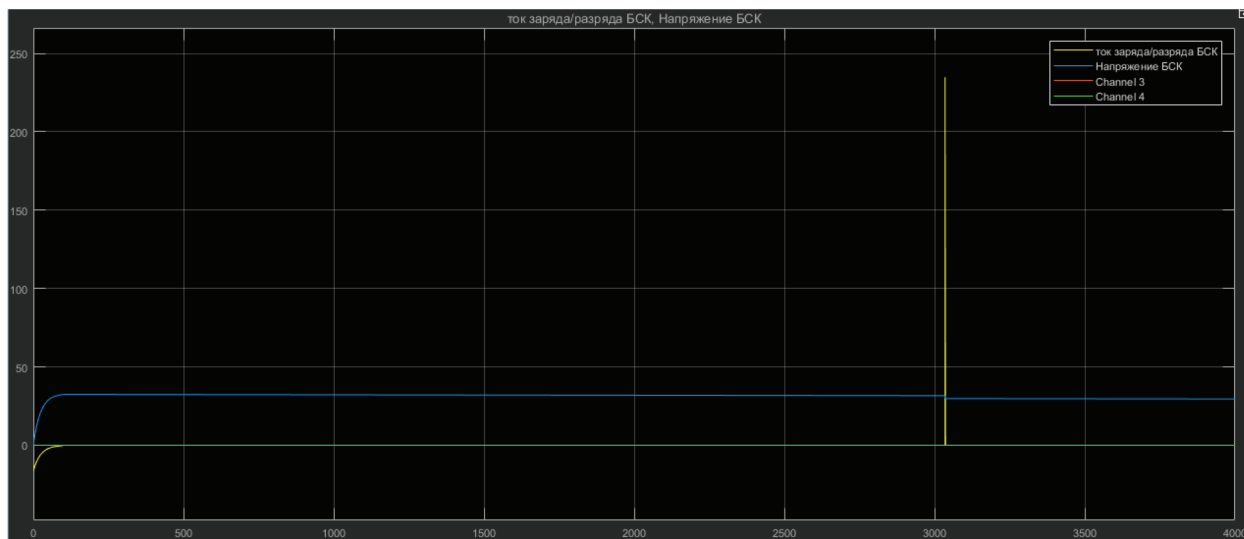
Емкость блока суперконденсаторов, Ф . . . . .	1,5
Максимальное напряжение блока суперконденсаторов, В . . . . .	33
Саморазрядное сопротивление блока суперконденсаторов, Ом . . . . .	10
Електроемкость аккумуляторной батареи, А·ч . . . . .	150
Напряжение аккумуляторной батареи, В . . . . .	29,6
Напряжение дополнительного питания, В . . . . .	33
Эквивалентное сопротивление стационарной нагрузки в СЭС, Ом . . . . .	0,4
Эквивалентное сопротивление импульсной нагрузки в СЭС, Ом . . . . .	0,2

Электрические параметры суперконденсаторов и физика их работы для разработки адекватной имитационной математической модели уточнялись и по последним научным исследованиям в области суперконденсаторов [16–21].

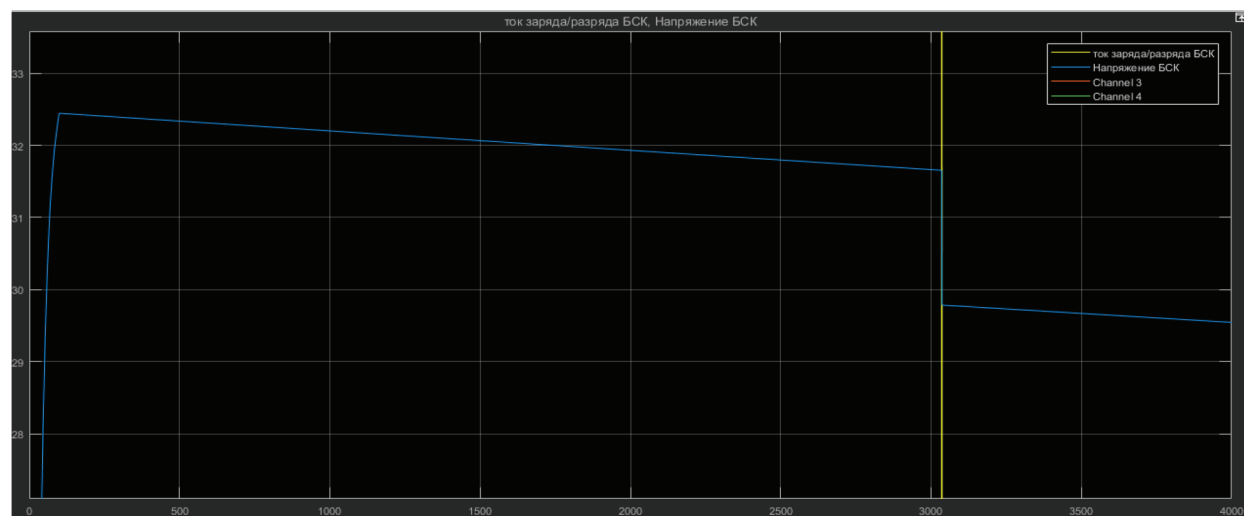
### Результаты и обсуждение

Математическое моделирование гибридного НЭЭ в системе электроснабжения перспективно ВКА проводилось по схеме (рис. 4).

Получены результаты (рис. 5) моделирования по циклограмме (см. рис. 3). Аккумуляторная батарея в моделировании не участвовала. На графике (см. рис. 5) слева наблюдается режим заряда блока суперконденсаторов, который составил 100 с. Далее — 3000 с (50 мин) — продолжительное практически незаметное падение напряжения блока суперконденсаторов, вызванное его саморазрядом. В момент времени 3035 с длительностью 0,1 с наблюдался импульс тока на нагрузку 235 А, а напряжение при этом упало



**Рис. 5.** Результаты математического моделирования по циклограмме рис. 2 (без учета аккумуляторной батареи)  
**Fig. 5.** The results of mathematical modeling according to the cyclogram Fig. 2 (excluding battery)



**Рис. 6.** Падение напряжения блока суперконденсаторов при импульсе электрического тока  
**Fig. 6.** Voltage drop of a block of supercapacitors with an electric current pulse

с 34 до 29,6 В (см. рис. 6). Это свидетельствует о том, что блок суперконденсаторов способен обеспечить кратковременное питание всей нагрузки перспективного ВКА в течение 0,1 с без падения напряжения ниже напряжения аккумуляторной батареи, которое с учетом сборки из восьми ячеек по 3,5 В составит не более 29,6 В.

Отладка схемы рис. 3 в настоящее время продолжается, но основные результаты подтвердили возможность обеспечения всей нагрузки перспективного ВКА средствами блока суперконденсаторов.

Важной проблемой, которую необходимо решить при дальнейших моделировании и проектировании гибридного НЭЭ является контроль трех источников энергии с различным напряжением:

- внешнего дополнительного питания — 33 В;

- блока суперконденсаторов — 34 В;
- аккумуляторной батареи — 29,6 В.

При этом важно обеспечить высокие живучесть и надежность гибридного НЭЭ. К примеру, введение многочисленных диодных блоков для защиты от перезаряда отдельных НЭЭ в гибридном накопителе ведет к уменьшению КПД гибридного НЭЭ и существенно влияет на рост массы гибридного НЭЭ и дополнительные тепловые потери на них, поэтому интенсивно продолжается отладка математической модели рис. 4. Для контроля процессов автоматического контроля заряда/разряда необходима глубокая проработка логики блока управления и коммутации гибридного НЭЭ.

Тем не менее при проработке модели рис. 4 было подтверждено выполнение требований циклограммы рис. 3.

Удельная энергоемкость гибридного НЭЭ по предварительным расчетам и самым завышенным характеристикам составных частей (диодов, силовых ключей и т. п.) может составить не более 100 Вт·ч/кг. Удельная мощность аккумуляторной батареи составила — 150, блока суперконденсаторов — 600 Вт/кг.

В итоге удельная мощность гибридного НЭЭ может составить не менее 600 Вт/кг, что является искомым результатом.

## Выводы

1. По результатам проведенных тестов были уточнены предварительно рассчитанные электрические параметры аккумуляторной батареи и суперконденсаторов в составе гибридного НЭЭ и рассчитаны его удельные энергоемкость и мощность применительно к СЭС перспективных ВКА.

2. С учетом уточненных параметров блока суперконденсаторов и временных интервалов заряда/разряда, адекватных циклограмме рис. 3, доказана возможность обеспечения всей нагрузки перспективного ВКА средствами блока суперконденсаторов на время 0,1 с, что является суммой трех импульсов электрического тока по 30 мс (эквивалент подрыву пиросредств посадки перспективного ВКА).

## Список литературы

- [1] Носкин Г.В., Харагезов Е.И., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Первичные химические источники тока в электропитании пилотируемых возвращаемых космических аппаратов // Космическая техника и технологии, 2019. № 2(19). С. 15–24.
- [2] Cleveland C.J., Morris Ch.G. Handbook of energy. Waltham, MA [etc.] : Elsevier, 2006, p. 1454.
- [3] Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. Новосибирск: Наука, 1994, С. 318.
- [4] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1964. С. 730.
- [5] Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры // Компоненты и технологии, 2006. № 9 (62). С. 12–17.
- [6] Jinrong Qian Li-ion battery-charger solutions for JEITA compliance // Texas Instruments Incorporated. Analog Applications J., 2010, no. 10, pp. 8–11.
- [7] Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуля-

торы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справочник. СПб.: Химиздат, 2005. 264 с.

- [8] Бобрикова И.Г. Введение в электрохимические технологии. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет, 2017. 184 с.
- [9] Коровин Н.В. Новые химические источники тока. М: Энергия, 1978, 184 с.
- [10] Gerald Halpert, Harvey Frank, and Subbarao Surampudi Batteries and Fuel Cells in Space // The Electrochemical Society Interface, 1999, no. 8, pp. 25–30.
- [11] Чуриков А.В., Казаринов И.А. Современные источники тока / Электронный вариант курса лекций. Саратов, 2008. 49 с. URL: [https://www.studmed.ru/churikov-av-kazarinov-ia-sovremennye-himicheskie-istochniki-toka\\_c35e51ca828.html](https://www.studmed.ru/churikov-av-kazarinov-ia-sovremennye-himicheskie-istochniki-toka_c35e51ca828.html) (дата обращения 18.01.2019).
- [12] Батраков Ю.А., Туманов Б.И., Алашкин В.М., Ромадин В.Ф. Литий ионная батарея с феррофосфатным катодом: Патент РФ № 2373614. URL: <https://findpatent.ru/patent/237/2373614.html> (дата обращения 18.01.2019).
- [13] Conway B.E. Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications. N.Y.: Springer, 1999, 736 p.
- [14] Belyakov A.I., Brintsev A.M. Transient Processes in High Power Discharge of Electrochemical Capacitors // Proceedings of the 13th Int. Sem. on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 8–10, 2003, Deerfield Beach, FL, USA.
- [15] Belyakov A.I. Application of Large Supercapacitors Today and Tomorrow // Proc. of power systems world-98. USA, Santa Clara, 1998.
- [16] Galizzioli D., Tantardini F., Trasatti S. Ruthenium Dioxide: A New Electrode Material. 1. Behavior in Acid Solutions of Inert Electrolytes // J. Appl. Electrochem, 1974, v. 4, p. 57.
- [17] Belyakov A.I., Brintsev A.M. Development and application of Combined Capacitors: Double Electric Layer — Pseudocapacity // Proc. of the 7th Intern. Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. USA, Deerfield Beach, FL, 1997.
- [18] Khomenko V., Raymundo-Pinero E., Beguin F. Development of High Performance Hybride Supercapacitors Based on  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>/Carbon Nanotubes Composites // Conf. proceedings «New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems: Batteries, Supercapacitors and Fuel Cells» / Ed. I.V. Barsukov. USA, Argonne: Springer Nature., 2003, pp. 33–40
- [19] Morimoto T., Tsushima M., Che Y. Hybrid Capacitors Using Organic Electrolytes // Electrochemical Capacitors and Hybride Power Sources. R.J. Brodd, Elchem. Soc., Pennington, N.D., 2002, v. 7, 357 p.
- [20] Suematzu S., Shkolnik N. Advanced Supercapacitors Using New Electroactive Polymers // Advanced Capacitor World Summit 2005. USA, San Diego CA, 2005, pp. 45–54.
- [21] Belyakov A.I. Asymmetric Type Electrochemical Capacitors // Electrochemical Capacitor and Hybride Power Sources / Ed. R.J. Brodd, Elchem. Soc., Pennington, N.D., v. 7, 2002, 121–139.

## Сведения об авторах

**Носкин Герман Вениаминович** — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ПАО РКК «Энергия», [post2@rsce.ru](mailto:post2@rsce.ru)

**Хаванов Егор Сергеевич** — аспирант, инженер ПАО РКК «Энергия», [post2@rsce.ru](mailto:post2@rsce.ru)

**Бесчастный Роман Александрович** — инженер ПАО РКК «Энергия», [post2@rsce.ru](mailto:post2@rsce.ru)

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.



# HYBRID ELECTRIC POWER STORAGE BASED ON LITHIUM-ION BATTERIES AND SUPERCAPACITORS BLOCKS FOR POWER SUPPLY SYSTEM OF EARTH RETURN SPACECRAFT

G.V. Noskin, E.S. Khavanov, R.A. Beschastnyy

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia), 4a, Lenin st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia  
post@rsce.ru

A block diagram of the hybrid electric energy storage device based on a lithium-ion battery and supercapacitors block for a return spacecraft has been developed. A supercapacitors block is included in the hybrid power storage for realizing high short-term power when powering the ship's pyrotechnic facilities. To clarify the electrical parameters of the storage units, taking into account the maximum load requirements of the maximum load requirements of the returned spacecraft, the imitation mathematical model has been developed. According to the results of the tests and addition calculations, the main parameters of the units were clarified. The specific energy intensity and power density of the hybrid source applied to a perspective returned spacecraft were calculated.

**Keywords:** hybrid electric power storage, power supply system, lithium-ion batteries, perspective returned spacecraft, supercapacitor, imitation mathematical model

**Suggested citation:** Noskin G.V., Khavanov E.S., Beschastnyy R.A. *Gibridnyy nakopitel' elektricheskoy energii na osnove lityi-ionnykh akkumulyatorov i blokov superkondensatorov dlya sistem elektrosnabzheniya vozvrashchaemykh kosmicheskikh apparatov* [Hybrid electric power storage based on lithium-ion batteries and supercapacitors blocks for power supply system of Earth return spacecraft]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 39–48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48

## References

- [1] Noskin G.V., Kharagezov E.I., Khavanov E.S., Beschastnyy R.A. *Pervichnye khimicheskie istochniki toka v elektrosnabzhenii pilotiruemykh vozvrashchaemykh kosmicheskikh apparatov* [Primary Chemical Power Sources in Power Supply for Manned Returnable Spacecraft] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Engineering and Technology], 2019, no. 2 (19), pp. 15–24.
- [2] Cleveland C.J., Morris Ch.G. *Handbook of energy*. Waltham, MA [etc.]: Elsevier, 2006, p. 1454.
- [3] Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Power supply systems of space vehicles]. Novosibirsk: Nauka [Science], 1994, p. 318.
- [4] Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher School], 1964, p. 730.
- [5] Pankrashkin A. *Ionistory Panasonic: fizika, printsip raboty, parametry* [Ionistors Panasonic: physics, principle of operation, parameters] *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2006, no. 9 (62), pp. 12–17.
- [6] Jinrong Qian Li-ion battery-charger solutions for JEITA compliance. Texas Instruments Incorporated. *Analog Applications Journal*, 2010, no. 10, pp. 8–11.
- [7] Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S.B. *Germetichnye khimicheskie istochniki toka: Elementy i akkumulyatory. Oborudovanie dlya ispytaniy i ekspluatatsii: Spravochnik* [Sealed chemical current sources: cells and batteries. Testing and operation equipment]. Saint Petersburg: Khimizdat, 2005, 264 p.
- [8] Bobrikova I.G. *Vvedenie v elektrokhimicheskie tekhnologii* [Introduction to electrochemical technology]. Novocherkassk: Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet [South Russian State Polytechnic University], 2017, 184 p.
- [9] Korovin N.V. *Novye khimicheskie istochniki toka* [New chemical current sources]. Moscow: Energiya, 1978, 184 p.
- [10] Gerald Halpert, Harvey Frank, and Subbarao Surampudi *Batteries and Fuel Cells in Space*. The Electrochemical Society Interface, 1999, no. 8, pp. 25–30.
- [11] Churikov A.V., Kazarinov I.A. *Sovremennye istochniki toka / Elektronnyy variant kursa lektsiy* [Modern current sources / Electronic version of the course of lectures]. Saratov, 2008. 49 p. URL: [https://www.studmed.ru/churikov-av-kazarinov-ia-sovremennye-himicheskie-istochniki-toka\\_c35e51ca828.html](https://www.studmed.ru/churikov-av-kazarinov-ia-sovremennye-himicheskie-istochniki-toka_c35e51ca828.html) (accessed 18.01.2019).
- [12] Batrakov Yu.A., Tumanov B.I., Alashkin V.M., Romadin V.F. *Lityi ionnaya batareya s ferrofosfatnym katodom* [Lithium-ion battery with a ferrophosphate cathode]: Patent of the Russian Federation no. 2373614. URL: <https://findpatent.ru/patent/237/2373614.html> (accessed 18.01.2019).
- [13] Conway B.E. *Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications*. N.Y.: Springer, 1999, 736 p.
- [14] Belyakov A.I., Brintsev A.M. *Transient Processes in High Power Discharge of Electrochemical Capacitors*. Proceedings of the 13th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 8–10, 2003, Deerfield Beach, FL, USA.
- [15] Belyakov A.I. *Application of Large Supercapacitors Today and Tomorrow*. Proc. of power systems world-98. USA, Santa Clara, 1998.
- [16] Galizzoli D., Tantardini F., Trasatti S. *Ruthenium Dioxide: A New Electrode Material. 1. Behavior in Acid Solutions of Inert Electrolytes*. *J. Appl. Electrochem*, 1974, v. 4, p. 57.
- [17] Belyakov A.I., Brintsev A.M. *Development and application of Combined Capacitors: Double Electric Layer — Pseudocapacity*. Proc. of the 7th Intern. Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. USA, Deerfield Beach, FL, 1997.
- [18] Khomenko V., Raymundo-Pinero E., Beguin F. *Development of High Performance Hybride Supercapacitors Based on  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>/Carbon Nanotubes Composites // Conf. proceedings «New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems: Batteries, Supercapacitors and Fuel Cells» / Ed. I.V. Barsukov. USA, Argonne: Springer Nature., 2003, pp. 33–40.*

- [19] Morimoto T., Tsushima M., Che Y. Hybrid Capacitors Using Organic Electrolytes. *Electrochemical Capacitors and Hybride Power Sources*. R.J. Brodd, Elchem. Soc., Pennington, N.D., 2002, v. 7, 357 p.
- [20] Suematzu S., Shkolnik N. Advanced Supercapacitors Using New Electroactive Polymers. *Advanced Capacitor World Summit 2005*. USA, San Diego CA, 2005, pp. 45–54.
- [21] Beliakov A.I. Asymmetric Type Electrochemical Capacitors. *Electrochemical Capacitor and Hybride Power Sources* / Ed. R.J. Brodd, Elchem. Soc., Pennington, N.D., v. 7, 2002, 121–139.

## Authors' information

**Noskin German Veniaminovich** — Cand. Sci. (Tech.), Leading research scientist of the RSC Energia, post2@rsce.ru

**Khavanov Egor Sergeevich** — Postgraduate, Engineer of the RSC Energia, , post2@rsce.ru

**Beschastnyy Roman Aleksandrovich** — Engineer of the RSC Energia, post2@rsce.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.