



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-90-98>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.311.001.57

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СХЕМОТЕХНИКИ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АККУМУЛЯТОРНО-ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В.П. ВАСИЛЕВИЧ, М.Е. ЗБЫШИНСКАЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 18 мая 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Цель настоящей работы – исследование структуры и схемотехнических решений автономной фотоэлектрической установки с аккумуляторно-емкостным накопителем энергии для обеспечения стабильности напряжения в условиях импульсного характера нагрузки и переменного характера генерируемой солнечной панелью мощности. Предложена оригинальная активная схема управления гибридным накопителем. Пиковая мощность солнечной панели составила 100 Вт. Аккумуляторная часть накопителя энергии была представлена гелевой свинцово-кислотной 12 В батареей с зарядной емкостью 11 А·ч, а емкостная часть состояла из батареи суперконденсаторов с электростатической емкостью 80 Ф, рабочим напряжением 15,5 В. В качестве нагрузки при стационарном разряде накопителя служил реостат сопротивлением 12 Ом, а импульсный характер разряда имитировался с помощью автомобильного воздушного компрессора. Выполнен анализ вариантов схемотехнических решений, реализующих процесс зарядки емкостной части накопителя энергии от солнечной панели напрямую или через шунтовой DC/DC преобразователь. Заряд и разряд аккумуляторной части накопителя управлялся контроллером ProStar-15. В обоих случаях использовались буферные режимы заряда аккумуляторной и емкостной частей накопителя энергии. Результаты исследований определили пути повышения стабильности выходного напряжения в условиях импульсной нагрузки и переменного характера генерации электроэнергии при увеличении ресурса дорогостоящей аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: автономная фотоэлектрическая установка, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, суперконденсатор, гибридный накопитель электроэнергии, контроллер заряда и разряда.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Василевич В.П., Збышинская М.Е. Особенности структуры и схемотехники автономной фотоэлектрической установки с аккумуляторно-емкостным накопителем энергии. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 90-98.

STRUCTURE AND CIRCUIT ENGINEERING FEATURES OF STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH A BATTERY-CAPACITIVE ENERGY STORAGE DEVICE

VLADIMIR P. VASILEVICH, MARIYA Y. ZBYSHYNSKAYA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 18 May 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The purpose of this research is to analyze the structure and circuit design of stand-alone photovoltaic system with a battery-capacitive energy storage device to ensure voltage stability under peak voltage and a variable nature of the power generated by a solar panel. There is an original active control scheme for a hybrid drive. The peak power of the solar panel was 100 W. The battery part of the energy storage device was represented by a 12 V gel lead-acid battery with a charging capacity of 11 Ah, and the capacitive part consisted of a battery of supercapacitors with an electrostatic capacity of 80 F, an operating voltage of 15.5 V. A rheostat was used as a load during a stationary discharge of the storage device with a resistance of 12 Ohm, and the pulsed nature of the discharge was simulated using an automobile air compressor. The analysis of circuit design variants that implement the charging process the capacitive part of the energy storage device from a solar panel directly or with a shunt DC/DC converter is performed. Charging and discharging of the battery part was controlled by the ProStar-15 controller. In both cases, charging buffer modes the battery and capacitive parts of the energy storage device were used. The research results have identified ways to increase the stability of the output voltage under peak voltage and the variable nature of electricity generation conditions while increasing the resource of an expensive battery.

Keywords: stand-alone photovoltaic system, solar battery, storage battery, supercapacitor, hybrid energy storage device, charge and discharge controller.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y. Structure and Circuit Engineering Features of Stand-alone Photovoltaic System with a Battery-capacitive Energy Storage Device. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 90-98.

Введение

Электроэнергия, вырабатываемая автономными фотоэлектрическими системами (АФЭС), имеет большой потенциал для удовлетворения текущих и будущих потребностей в электроэнергии как для запускаемых в околоземное пространство космических аппаратов, так и для мобильных устройств наземного базирования. Мощность АФЭС находится в пределах 0,1...1000 кВт, при этом АФЭС мощностью от 0,1 до 10 кВт условно относят к маломощным, от 10 до 100 кВт – средней мощности, выше 100 кВт – автономным системам энергообеспечения большой мощности. Например, международная космическая станция (МКС), является на настоящий момент крупнейшим и наиболее сложным международным космическим проектом в истории. Энергообеспечение МКС осуществляется АФЭС посредством массива солнечных модулей суммарной мощностью 256 кВт. Так как доступность солнечной энергии и в космосе и в земных условиях является непостоянной величиной, все АФЭС оснащаются накопителями энергии [1–10].

Устройства накопления электроэнергии можно разделить на три основные категории: аккумуляторные батареи (АБ), суперконденсаторы (СК) и их гибридную модификацию АБ+СК. АБ хранят энергию в виде химических реагентов, тогда как СК хранят энергию непосредственно в виде электрического заряда. Из-за этого принципиального различия между категориями они имеют разные выходные параметры энергии и мощности, циклируемости заряда-разряда и временные рамки зарядно-разрядных процессов, что требует применения специальных управляющих АФЭС электронных схмотехнических устройств.

Как показывают многочисленные исследования [4, 11–15], АБ способны запасать больше энергии на единицу массы, чем СК, вследствие использования электрохимических реакций, которые также называют фарадеевскими процессами. Данные процессы ответственны за перенос заряда через границу между электродами АБ и раствором электролита, приводят к окислительно-восстановительным реакциям на границах раздела. При заряде или разряде окислительно-восстановительные реакции изменяют молекулярную или кристаллическую структуру материалов электродов, что зачастую влияет на стабильность их работы и приводит к необходимости замены батареи после нескольких тысяч циклов заряда-разряда.

С другой стороны, у СК нет существенных изменений в свойствах материалов электродов в процессе эксплуатации, поэтому их можно заряжать и разряжать миллионы раз. Электростатические процессы накопления и отдачи заряда, используемые в СК, протекают намного быстрее, чем фарадеевские процессы в АБ, поэтому хотя СК имеют более низкую плотность энергии, чем АБ, они имеют более высокую плотность мощности. Кроме того, скорость их работы сильно различается: СК могут заряжаться и разряжаться за секунды, тогда как для зарядки высокоэффективных аккумуляторных батарей требуется более десятков минут, а для разрядки – часы или дни. Это привело к различным приложениям и возможностям в зависимости от требований к производительности. В действительности некоторые важные приложения требуют совместного использования АБ и ЭК. Однако производительность и управляемость современных накопителей энергии пока еще не соответствует требованиям эффективного использования электроэнергии. Например, устройства с более высокой плотностью энергии и мощности, более быстрой скоростью перезарядки и более длительным циклом зарядки-разрядки необходимы в качестве замены автомобилей с жидкотопливным двигателем на гибридные автомобили и электромобили.

Задача настоящих исследований состоит в том, чтобы на основе анализа структуры и схемотехники, использования компонентов современной управляющей и силовой электроники обозначить предпосылки создания надежных интеллектуальных АФЭС с гибридными аккумуляторно-емкостными накопителями энергии.

Методика проведения эксперимента

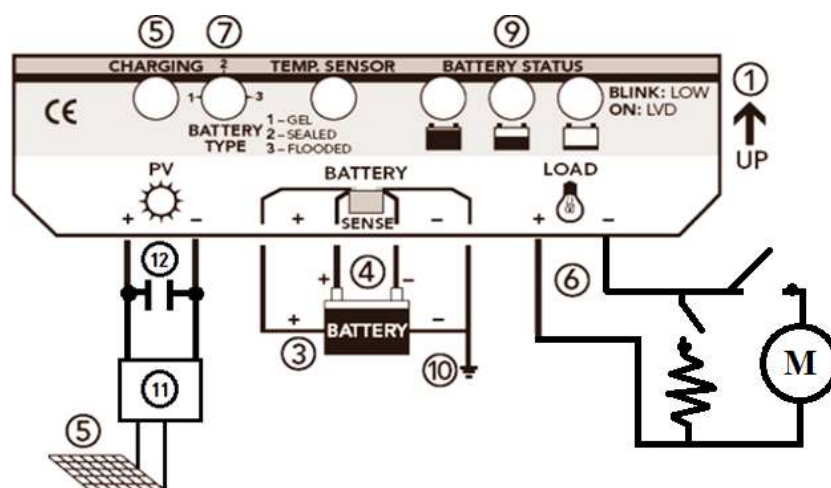
Исследователи схемотехнических вариантов исполнения выделяют три основных типа систем гибридных накопителей энергии [5]:

- пассивная схема, представляющая собой параллельное соединение аккумулятора и суперконденсатора с непосредственным подключением к нагрузке;
- полуактивная схема в виде параллельного соединения аккумулятора и суперконденсатора с использованием одного DC/DC преобразователя;
- активная схема, в которой для соединения аккумулятора и суперконденсаторного блока с нагрузкой используется несколько DC/DC преобразователей.

В более ранней работе [11] авторами исследовалась пассивная схема гибридного накопителя. От этого варианта пришлось отказаться из-за неуправляемого характера обмена энергией и инверсии токов в контуре параллельного соединения аккумуляторной и емкостной частей накопителя с непосредственным подключением к нагрузке.

В настоящей работе использовалась экспериментальная автономная фотоэлектрическая установка, упрощенная структурная схема которой приведена на рис. 1.

Солнечная панель мощностью 100 Вт состояла из двух модулей MC-50, соединенных параллельно. Ток короткого замыкания панели был равен 6,4 А, напряжение холостого хода – 17 В. Аккумуляторная часть накопителя энергии была представлена гелевой свинцово-кислотной 12 В батареей с зарядной емкостью 11 А·ч, а емкостная часть состояла из блока суперконденсаторов с электростатической емкостью 80 Ф, номинальным напряжением 15,5 В. В качестве регулятора заряда и разряда АБ использовался 12 В контроллер ProStar-15 с функцией ШИМ-модуляции зарядного тока. В качестве нагрузки при стационарном разряде накопителя служил реостат сопротивлением 12 Ом, а импульсный характер разряда имитировался с помощью подключения в качестве нагрузки автомобильного воздушного компрессора.



1 – цоколь контроллера ProStar-15; 2 – допустимая сила тока – 15 А; 3 Battery – подключение АБ 12 В, 11 А·ч; 4 – “Sense” – подключение датчика температуры АБ; 5 – подключение солнечной батареи, подключение регулятора заряда СК, подключение СК; 6 – подключение нагрузки; 7 – установка типа АБ; 8 – автоматическое определение напряжения сети 12 В/24 В; 9 – индикатор степени заряда АБ; 10 – заземление; 11 – шунтовой регулятор заряда СК; 12 – СК

Рис. 1. Структурная активная схема автономной фотоэлектрической установки с гибридным аккумуляторно-емкостным накопителем электроэнергии

Fig. 1. Structural-active circuit of stand-alone photovoltaic system with a hybrid battery-capacitive energy storage device

Экспериментальная установка позволяла моделировать различные варианты коммутации элементов схемы, а проверка работоспособности вариантов осуществлялась системой индикации и диагностики контроллера ProStar-15. Для защиты солнечной панели и накопителей энергии от токов обратной полярности использовались блокирующие диоды Шоттки, имеющие максимальное падение напряжения в прямом включении не более 0,5 В при прямом токе 10 А. Узловыми моментами работоспособности схемы являлись необходимость отсутствия разряда АБ через разряженный СК, представляющий собой короткозамкнутую нагрузку, обработка установленного алгоритма заряда АБ и обеспечение буферных режимов заряда суперконденсаторной и аккумуляторной частей гибридного накопителя энергии при подключении одного или нескольких потребителей энергии.

Буферный режим заряда СК и АБ выполнял функции обеспечения энергоснабжения нагрузки при прерывистом поступлении энергии для заряда накопителя и обеспечения необходимого количества энергии при неравномерном потреблении ее нагрузкой. Временной приоритет заряда в гибридном накопителе был отдан его суперконденсаторной части, т. е. вначале от солнечной батареи заряжался СК, а затем при достижении напряжения на нем, превышающего напряжение АБ, осуществлялся управляемый контроллером заряд аккумулятора. Управление зарядом СК осуществлялось с помощью разработанного шунтового регулятора (поз. 11 на рис. 1.).

Результаты и их обсуждение

Выполнен анализ структурных и схемотехнических решений, реализующих процесс зарядки емкостного накопителя энергии. Для источника энергии разряженный СК представляет собой короткозамкнутую нагрузку. Кстати, фотоэлектрические преобразователи могут работать на нулевое сопротивление, а значит, способны заряжать СК с нуля.

На рис. 2 приведена схема простого и наиболее эффективного зарядного устройства, применимого, однако, только в тех случаях, когда напряжение холостого хода солнечной батареи не выходит за границы, допустимые для СК. Диод Шоттки предохраняет СК от разряда через солнечную батарею в темное время суток.

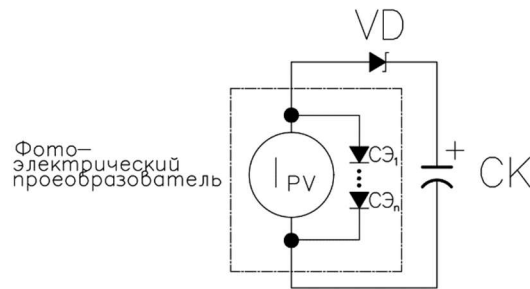


Рис. 2. Схема заряда СК напрямую от солнечной батареи
Fig. 2. Supercapacitor charging scheme directly from the solar panel

В изображенной на рис. 2 схеме в начальный момент напряжение на СК равно 0 В, вследствие чего фотоэлектрический преобразователь закорочен и выдает максимально возможный ток. По мере заряда СК ток уменьшается в соответствии с вольт-амперной характеристикой фотоэлектрического преобразователя.

Если напряжение холостого хода солнечной батареи превышает рабочее напряжение СК, для его защиты авторами разработана схема шунтового регулятора напряжения (рис. 3). Шунтовой (параллельный) регулятор выбран, как наиболее энергосберегающий способ понижения напряжения солнечной батареи для защиты СК от перегрузки по току. После того как СК зарядился, энергия солнечной батареи перераспределяется контроллером между зарядом АБ и нагрузкой, а ее избыток регулятор просто рассеивает в виде тепла.

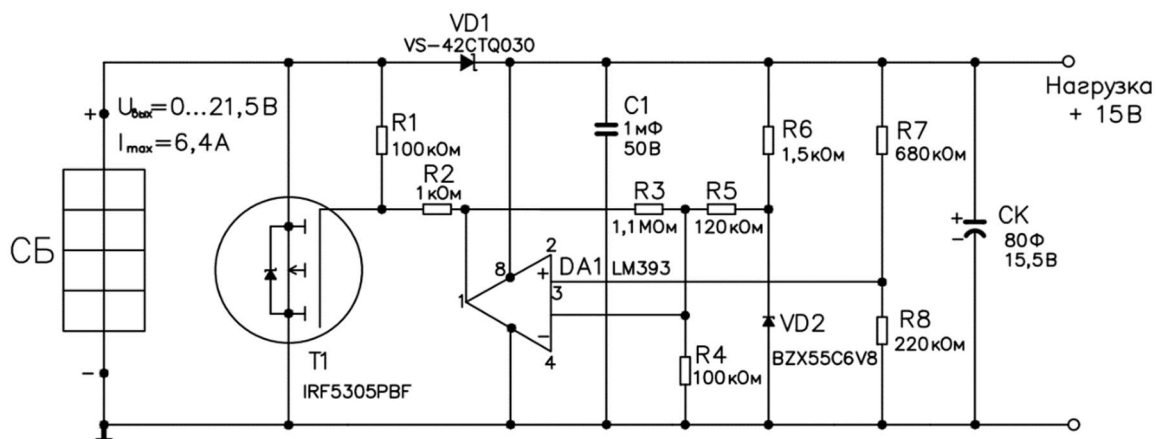
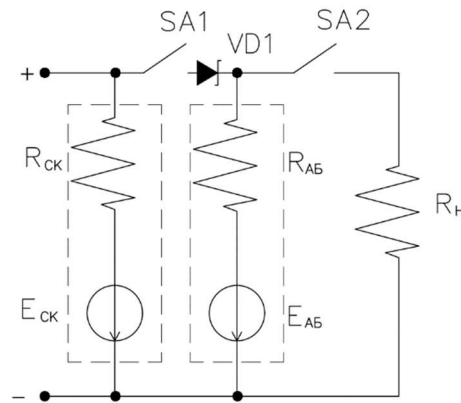


Рис. 3. Разработанная схема шунтового (параллельного) регулятора заряда СК
Fig. 3. The developed circuit of the shunt (parallel) supercapacitor charge controller

В схеме, приведенной на рис. 3, использована микросхема компаратора LM393 и источник опорного напряжения, образованный резистивным делителем. Микросхема имеет открытый сток на выходе при выключенном регуляторе, представляющим собой обрыв. Диод Шоттки VS-42CTQD30 выбран из-за низкого значения падения на нем прямого напряжения. При превышении напряжения, вырабатываемого солнечной батареей, уровня 15 В с делителя на затвор транзистора T1 поступает потенциал, транзистор открывается, шунтируя ток, поступающий в нагрузку, в результате чего напряжение на суперконденсаторе не превышает требуемого значения 15 В. VD 2 BZX55C6V8 стабилитрон имеет номинальное напряжение стабилизации 6,8 В, ток стабилизации 5 мА, мощность рассеяния 0,5 Вт.

Как показано в более ранней работе [11], для СК емкостью 80 Ф при рабочем напряжении 15,5 В при отсутствии подзарядки характерно наличие саморазряда в виде спада напряжения на 0,25 В в сутки при нулевом значении этого показателя у АБ. Это говорит о том, что в составе гибридного аккумуляторно-емкостного накопителя суперконденсатор должен иметь значительную емкость для создания запаса энергии и находиться в состоянии постоянной подзарядки, т. е. работать в буферном режиме, который реализуется в схемах, приведенных на рис. 2, 3.

Исследована структурная схема (рис. 4) и особенности работы буферного режима зарядки АБ от СК. Важной особенностью этого режима является то, что выходное напряжение суперконденсатора задается на 0,05–2,50 В больше максимального напряжения для заряженного аккумулятора, а значение этого напряжения будет зависеть от конкретного типа аккумулятора, причем надо учитывать, что оптимальное напряжение несколько меняется при изменении температуры аккумулятора.



$E_{СК}$ – ЭДС СК; $R_{СК}$ – внутреннее сопротивление СК; $E_{АБ}$ – ЭДС АБ; $R_{АБ}$ – внутреннее сопротивление АБ; $R_{Н}$ – сопротивление нагрузки; SA1, SA2 – выключатели; VD1 – диод Шоттки

Рис. 4. Эквивалентная схема буферного режима зарядки аккумулятора от суперконденсатора
Fig. 4. Buffer mode Equivalent circuit of charging battery from supercapacitor

При отключенной нагрузке процесс заряда следующий: ЭДС зарядного устройства $E_{СК}$ выше ЭДС аккумулятора $E_{АБ}$ и направлена встречно напряжению аккумулятора. Сумма падений напряжения в контуре заряда равна алгебраической сумме ЭДС этого контура. Таким образом, ток заряда зависит от разности ЭДС зарядного устройства $E_{СК}$ и от общего сопротивления цепи, которое состоит из внутренних сопротивлений СК и АБ:
$$I_3 = \frac{E_{СК} - E_{АБ}}{R_{СК} - R_{АБ}} .$$

Внутренние сопротивления $R_{СК}$ и $R_{АБ}$ можно считать практически постоянными. Таким образом, значение зарядного тока будет зависеть от разности ЭДС $E_{СК}$ и $E_{АБ}$. Вследствие того, что внутренние сопротивления малы по значению, если АБ разряжена, то ток заряда может стать больше допустимого для конкретной АБ или зарядного устройства. Следовательно, контроллер заряда АБ обычно выполняется по схеме с ограничением максимального тока и применяется для аккумуляторов определенного типа и емкости. По мере зарядного процесса аккумулятора разница ЭДС, а соответственно, и ток заряда будут уменьшаться. Поэтому зарядный процесс АБ будет замедляться независимо от мощности, которую в это время способна выдавать солнечная батарея.

Если рассматривать режим разряда аккумулятора без зарядного тока, то данный режим, согласно рис. 4, будет работать, когда выключатель SA1 разомкнут, а выключатель SA2 замкнут. Ток разряда в таком случае зависит от ЭДС аккумулятора и суммы внутреннего и внешнего сопротивления и определяется по формуле
$$I_p = \frac{E_{АБ}}{R_{СК} - R_{АБ}} .$$

Напряжение на выводах аккумулятора будет равно ЭДС аккумулятора минус падение напряжения на его внутреннем сопротивлении
$$U = E_{АБ} - R_{АБ} I_H .$$

Ток через нагрузку и ток через внутреннее сопротивление одинаковый. Внутреннее сопротивление аккумулятора небольшое по значению, и ток в основном зависит от величины сопротивления нагрузки. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше потребляемый ток и величина падения на внутреннем сопротивлении и меньше напряжение на выводах аккумулятора.

Далее был рассмотрен режим одновременного заряда АБ от СК и его разряда через нагрузку, когда замкнуты контакты SA1 и SA2. Естественно, что если во время заряда АБ подключили нагрузку, которая потребляет меньший по сравнению с зарядным ток, то ток заряда

уменьшится на величину тока в нагрузке. При уменьшении сопротивления нагрузки и увеличении потребляемого тока зарядный ток АБ уменьшается и при некотором значении прекратится. Потребляемый от СК ток увеличивается, что приведет к некоторому падению напряжения до величины ЭДС АБ. Контроллер заряда АБ способен автоматически отключать нагрузку при снижении напряжения ниже допустимого уровня.

Заключение

Для решения задачи обеспечения стабильности напряжения в условиях импульсного характера нагрузки и переменного характера генерируемой солнечной панелью мощности исследована структура и схемотехнические решения автономной фотоэлектрической установки с гибридным аккумуляторно-емкостным накопителем энергии. Предложена оригинальная активная схема управления гибридным накопителем. От правильной настройки и режима использования оборудования, управляющего зарядом и разрядом накопителя зависит производительность всей системы, надежность и срок службы установки. Выполнен анализ вариантов схемотехнических решений, реализующих процесс зарядки емкостной части накопителя энергии от солнечной панели напрямую или через разработанный шунтовой DC/DC преобразователь. В обоих случаях использовались буферные режимы заряда аккумуляторной и емкостной частей накопителя энергии, выполняющих функции обеспечения энергоснабжения системы при прерывистом поступлении энергии для заряда аккумуляторной и емкостной частей накопителя и обеспечения необходимого количества энергии при неравномерном потреблении энергии нагрузкой. Результаты исследований определили пути повышения стабильности выходного напряжения в условиях импульсной нагрузки и переменного характера генерации электроэнергии при увеличении ресурса дорогостоящей аккумуляторной батареи.

Список литературы

1. Обухов С.Г., Плотников И.А., Ибрагим А., Масолов В.Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(1):64-76. DOI: 10.18799/24131830/2020/1.
2. Красовский В.И., Яцко П.В. Накопители энергии для улучшения режимов работы электрической энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии. *ЭБ БГУ: технические и прикладные науки. Сахаровские чтения 2020 г.: экологические проблемы XXI века, г. Минск, Республика Беларусь, Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета*. 2020:393-396. DOI: 10.46646/SAKH-2020-2-393-396.
3. Бердников Р.Н., Фортов В.Е., Сон Э.Е., Деньщиков К.К., Жук К.Э., Новиков Н.Л., Шакарян Ю.Г. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов. *Инновационные технологии и материалы. Новые технические средства. Энергия единой сети*. 2013;2(7):40-51.
4. Карабанов С.М., Мороз А.И., Суворов Д.В., Сливкин Е.В., Гололобов Г.П., Тарабрин Д.Ю. Автономные солнечные энергетические системы с использованием суперконденсаторов. *Вестник РГРТУ*. 2015;54(Ч. 2):137-142.
5. Марьенков С.А. Гибридный накопитель электрической энергии для сетей с распределенной генерацией на основе возобновляемых источников электрической энергии. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;2(56, Ч. 3):120-123. DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.007.
6. Саврасов Ф.В. Варианты построения автономных систем электроснабжения с использованием фотоэлектрических устройств и алгоритмы их работы. *Науковедение*. 2013;6:1-13.
7. 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*. 2019;23(4):39-48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48.
8. Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А., Фатеев Д.А. Использование блоков суперконденсаторов в системе электроснабжения возвращаемого аппарата пилотируемого транспортного корабля. *Космическая техника и технологии*. 2020;2(29):84-91. DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-2-84-91.

9. Носкин Г.В., Хаванов Е. С., Савельев В. В. Унифицированный резервный накопитель электрической энергии для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов. *Известия РАН. Энергетика*. 2019;5:20-25. DOI: 10.1134/S000233101905008X.
10. Шиняков Ю.А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*. 2007;1(12);123-129. DOI: 10.18287/2541-7533-2007-0-1(12)-123-129.
11. Василевич В.П., Збышинская М.Е. Зарядно-разрядные характеристики аккумуляторно-емкостного накопителя электроэнергии в составе автономной фотоэлектрической системы. *Доклады БГУИР*. 2022;20(2):78-85. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-2-78-85
12. Weingarth D., Foelske-Schmitz A., Kötz R. Cycle versus voltage hold: which is the better stability test for electrochemical double layer capacitors? *J. Power Sources*. 2012;225:84-88. DOI: 10.1016/j.powsour.2012.10.019.
13. Kötz R., Sauter J.C., Ruch P., Dietrich P., Büchi F.N., Magne P.A., Varenne P. Voltage balancing: long-term experience with the 250 V supercapacitor module of the hybrid fuel cell vehicle HY-LIGHT. *J Power Sources*. 2007;174:264-271. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.08.078.
14. Diab Y., Venet P., Gualous H., Rojat G. Self-discharge characterization and modeling of electrochemical capacitor used for power electronics applications. *IEEE Trans Power Electron*. 2009;24:511-517. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2007116.
15. Lazzari M., Soavi F., Mastragostino M. Dynamic pulse power and energy of ionic-liquid-based supercapacitor for HEV application. *J. Electrochem Soc*. 2009;156: A661-A666. DOI: 10.1149/1.3139046.

References

1. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Ibrahim A., Masolov V.G. Dual Energy Storage for Hybrid Energy Systems with Renewable Energy Sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(1):64-76. DOI: 10.18799/24131830/2020/1. (InRuss.)
2. Krasovski V.I., Yacko P.V. Energy storage as devices for improving the operation of the electric power system with renewable energy sources ed technical and applied sciences. *Sakharov readings 2020: environmental problems of the XXI century. Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk*. 2020:393-396. DOI: 10.46646/SAKH-2020-2-393-396. (InRuss.)
3. Berdnikov R.N., Fortov V.E., Son E.E., Den'shchikov K.K., Zhuk K.E., Novikov N.L., Shkaryan Yu.G. Hybrid electric power storage for ENES based on Li-ion batteries and supercapacitors Energy of Unified Grid. *Scientific and Technical Journal*. 2013;2(7):40-51. (InRuss.)
4. Karabanov S.M., Moroz A.I., Suvorov D.V., Slivkin Y.V., Gololobov G.P., Tarabrin D.Y. Stand-alone photovoltaic systems with supercapacitors. *Vestnik of RSREU*. 2015;54(P. 2):137-142. (InRuss.)
5. Marenkov S.A. Hybrid accumulator of electricity for networks with distributed generation based on renewable sources of electrical energy. *International Research Journal*. 2017;2(56, P. 3):120-123. DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.007. (InRuss.)
6. Savrasov F.V. Variants of the autonomous power supply systems's design with photovoltaic devices and algorithms for their work. *Naukovedenie*. 2013;6:1-13. (InRuss.)
7. Noskin G.V., Khavanov E.S., Beschastnyy R.A. [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;23(4):39-48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48. (InRuss.)
8. Khavanov E.S., Beschastny R.A., Fateev D.A. Using Super-capacitors Units in the Power Supply System of Re-entry Vehicle of a Crew Transportation Spacecraft. *Kosmicheskaya tekhnika iologii*. 2020;2(29):84-91. DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-2-84-91. (InRuss.)
9. Noskin G. V., Khavanov, E. S., Savelyev V. V. Unified Reserve Electric Power Storage for Power Supply Systems of Returning Spacecrafts. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2019;5:20-25. DOI: 10.1134/S000233101905008X. (InRuss.)
10. Shinyakov Yu. A. Extremal regulation of automatic space vehicle solar battery power. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2007;1(12):123-129. DOI: 10.18287/2541-7533-2007-0-1(12)-123-129. (InRuss.)
11. Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y. Charging and discharging characteristics of a battery capacitive energy storage device for stand-alone photovoltaic system. *Doklady BGUIR*. 2022;20(2):78-85. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-2-78-85
12. Weingarth D., Foelske-Schmitz A., Kötz R. Cycle versus voltage hold: which is the better stability test for electrochemical double layer capacitors? *J. Power Sources*. 2012;225:84-88. DOI: 10.1016/j.powsour.2012.10.019.
13. Kötz R., Sauter J.C., Ruch P., Dietrich P., Büchi F.N., Magne P.A., Varenne P. Voltage balancing: long-term experience with the 250 V supercapacitor module of the hybrid fuel cell vehicle HY-LIGHT. *J. Power Sources*. 2007;174:264-271. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.08.078.

14. Diab Y., Venet P., Gualous H., Rojat G. Self-discharge characterization and modeling of electrochemical capacitor used for power electronics applications. *IEEE Trans Power Electron.* 2009;24:511-517. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2007116.
15. Lazzari M., Soavi F., Mastragostino M. Dynamic pulse power and energy of ionic-liquid-based supercapacitor for HEV application. *J. Electrochem Soc.* 2009;156: A661-A666. DOI: 10.1149/1.3139046.

Вклад авторов

Василевич В.П. осуществил постановку задачи для проведения исследования, разработал схему лабораторного стенда, принимал участие в подготовке рукописи статьи.

Збышинская М.Е. выполнила снятие и анализ характеристик, подготовила рукопись статьи.

Authors' contribution

Vasilevich V.P. carried out the formulation of the problem for the study, developed the scheme of the laboratory stand, took part in the preparation of the article manuscript.

Zbyshinskaya M.Y. carried out the experiments and analysis, prepared article manuscript.

Сведения об авторах

Василевич В.П., к.т.н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Збышинская М.Е., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Vasivevich V.P., Cand. of Sci., Professor at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zbyshinskaya M.Y., Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
tel. +375-29-310-33-12;
e-mail: 10mash@mail.ru
Збышинская Мария Евгеньевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-310-33-12;
e-mail: 10mash@mail.ru
Zbyshinskaya Mariya Yevgen'evna