



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-2-78-85>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.355.9

## ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АККУМУЛЯТОРНО-ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В.П. ВАСИЛЕВИЧ, М.Е. ЗБЫШИНСКАЯ

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

*Поступила в редакцию 5 января 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Цель настоящей работы – исследование зарядно-разрядных характеристик гибридного накопителя электроэнергии, состоящего из двух параллельно включенных аккумуляторной и емкостной частей, для оценки работоспособности и эффективности его схемотехнического решения в составе автономной фотоэлектрической системы. Исследование кинетики тока заряда гибридного накопителя от солнечной батареи проводилось в натуральных условиях при удельной мощности падающего солнечного излучения 800–850 Вт/м<sup>2</sup>. Кинетика токов разряда аккумуляторного и емкостного накопителей получены при резистивной нагрузке с отключенной солнечной батареей. Динамика процессов заряда и разряда аккумуляторной и емкостной частей накопителя контролировались по скорости нарастания/спада напряжения. Аккумуляторная часть накопителя представлена в виде зарядно-пускового устройства на базе свинцово-кислотного гелевого аккумулятора с зарядной емкостью 11 А·ч, максимальным напряжением 12,8 В, максимально допустимым током разряда 15 А. Емкостная часть состояла из пускового устройства нового поколения суперконденсаторного типа INSPECTOR Booster с электростатической емкостью 80 Ф при допустимом напряжении 15,5 В и допустимым пусковым током 800 А. Источником энергии служила солнечная батарея с номинальным напряжением 12 В, пиковой мощностью 100 Вт. В качестве нагрузки при разряде накопителя служил реостат сопротивлением 6 Ом, с максимальным током потребления 15 А. Для мониторинга и управления фотоэлектрической системой использовался контроллер заряда/разряда Morningstar ProStar-15 с функцией широтно-импульсной модуляции. Получены количественные зарядно-разрядные характеристики аккумуляторно-емкостного накопителя для использования в разработке интеллектуальных автономных фотоэлектрических систем.

**Ключевые слова:** зарядно-разрядные характеристики, аккумуляторно-емкостной накопитель электроэнергии, гибридный накопитель энергии, автономная фотоэлектрическая система, суперконденсатор.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** 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.

## CHARGING AND DISCHARGING CHARACTERISTICS OF A BATTERY-CAPACITIVE ENERGY STORAGE DEVICE FOR STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEM

VLADIMIR P. VASILEVICH, MARIYA Y. ZBYSINSKAYA

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

*Submitted 5 January 2022*

© Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The purpose of the research is to study the charging-discharging characteristics of a hybrid energy storage device which consists of two parallel connected battery and capacitive parts to assess the work efficiency of its circuit design as a part of standalone photovoltaic system. The charge current kinetics of a hybrid storage device from a solar panel was carried out under natural conditions at a specific power of incident solar radiation of 800–850 W/m<sup>2</sup>. The discharge current kinetics of battery and capacitive storages were obtained with a resistive load and disconnected solar battery. The dynamics of charging and discharging processes of the battery and capacitive parts of the energy storage device were monitored by the voltage rise/fall rate. The battery part of the drive is charging and starting the device based on a lead-acid gel battery with a charging capacity of 11 A·h, 12.8 V maximum voltage, and 15 A maximum discharge current. The capacitive part consisted of a new generation INSPECTOR Booster supercapacitor starting the device with an electrostatic capacity of 80 F, 15.5 V voltage, and 800 A starting current. As the energy source a solar battery was used, with a 12 V nominal voltage and 100 W peak power. A 6 Ohm rheostat with 15 A consumption current was used as a load during the storage device discharge. A Morningstar ProStar-15 charging/discharging controller with a pulse-width modulation function was used to monitor and control the photovoltaic system. Quantitative charging and discharging characteristics of a battery-capacitive energy storage device were obtained for the use in the development of standalone photovoltaic system.

**Keywords:** charging and discharging characteristics, battery-capacitive energy storage device, hybrid energy storage device, stand-alone photovoltaic system.

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

**For citation.** Vasilevich V.P., Zbysinskaya 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.

### Введение

Применение в автономных фотоэлектрических системах электроснабжения гибридных аккумуляторно-емкостных накопителей энергии призвано решать актуальные задачи стабилизации напряжения, компенсации пусковых нагрузок и продления сроков эксплуатации аккумуляторных батарей. Принцип работы гибридного накопителя энергии заключается в том, что емкостная часть накопителя компенсирует кратковременные провалы напряжения, а аккумуляторная часть реагирует на длительные изменения напряжения на нагрузке [1–4].

Выбор структуры и схем управления гибридным накопителем рекомендуется проводить исходя из конкретных параметров фотоэлектрической системы с предварительным исследованием зарядно-разрядных процессов аккумулятора и блока суперконденсаторов [5–6].

Наиболее высокие схемотехнические требования предъявляются к сложным интеллектуальным автономным фотоэлектрическим системам, предназначенным для электроснабжения подвижных объектов, в том числе космических аппаратов [7–8].

Ранее авторами настоящей статьи был разработан лабораторный стенд и исследована кинетика напряжений зарядных и разрядных процессов аккумуляторного и емкостного накопителей энергии в составе фотоэлектрической системы и проверена ее работоспособность в натуральных условиях под солнечным освещением [8]. С использованием полученных

кинетических зависимостей [8] в настоящей работе рассчитана динамика зарядно-разрядных процессов в аккумуляторном и емкостном накопителях энергии.

Зарядно-разрядные свойства и схемотехническое решение управляющей электроники гибридных аккумуляторно-емкостных накопителей интенсивно исследуются, что способствует развитию интеллектуальных автономных фотоэлектрических систем и интерактивных систем сетевого энергоснабжения [9–16].

Задачей настоящей работы являлось сравнительное исследование зарядно-разрядных характеристик аккумуляторно-емкостного накопителя электроэнергии в составе автономной фотоэлектрической системы в натуральных условиях для последующего определения ее оптимального схемотехнического решения.

### Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования зарядно-разрядных характеристик аккумуляторно-емкостного накопителя электроэнергии проводились в составе автономной фотоэлектрической системы при естественном солнечном облучении. Суммарный уровень прямой и рассеянной составляющих солнечной радиации контролировался термоэлектрическим пиранометром «Пеленг СФ-06» и находился в диапазоне 800–850 Вт/м<sup>2</sup>, что позволяло оценивать КПД фотоэлектрического преобразования.

Динамика зарядно-разрядных процессов в литий-ионном аккумуляторе с энергетической емкостью 3400 мА·ч и суперконденсаторе с электростатической емкостью 40 Ф рассчитывалась по скорости нарастания и спада напряжения, В/с, при заряде и разряде соответственно.

Структурная электрическая схема лабораторного стенда для снятия токовых зарядно-разрядных характеристик приведена на рис. 1.

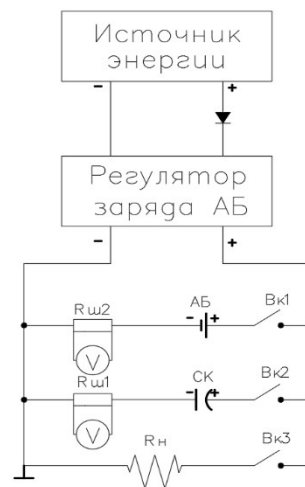


Рис. 1. Структурная электрическая схема лабораторного стенда для снятия токовых зарядно-разрядных характеристик аккумуляторно-емкостного накопителя энергии

Fig. 1. The block diagram of the testing bench for acquiring charging and discharging characteristics of a battery-capacitive energy storage device

Источником энергии являлась солнечная батарея (СБ), состоящая из двух модулей МС-50, соединенных параллельно. Пиковая мощность СБ составляла 100 Вт, напряжение холостого хода СБ – 15 В, а ток короткого замыкания – 6,4 А. СБ была сориентирована в южном направлении под углом 55° к горизонту.

В качестве аккумуляторной части накопителя использовался гелевый свинцово-кислотный аккумулятор с зарядной емкостью 11 А·ч, номинальным напряжением 12 В в составе автомобильного пуско-зарядного устройства.

Управление и мониторинг процессами заряда и разряда аккумуляторной части накопителя осуществлялось микроконтроллером Prostar-15 (Morningstar, США), являющимся, по данным производителя, одним из лучших в мире специальных приборов регулирования заряда в автономных фотоэлектрических системах. Prostar-15 – полностью автоматический контроллер,

осуществляющий регулирование заряда аккумуляторной батареи (АБ) от солнечной батареи. Работа контроллера не требует никаких ручных операций, кроме выбора типа АБ при первоначальной установке. Контроллер использует 4-стадийный алгоритм процесса заряда аккумулятора. Стадии алгоритма показаны на рис. 2.



Рис. 2. 4-стадийный алгоритм заряда аккумулятора  
Fig. 2. 4-stage battery charging algorithm

В качестве емкостной части накопителя использовалось пуско-зарядное устройство нового поколения INSPECTOR Booster суперконденсаторного типа с электростатической емкостью 80 Ф на напряжение 15,5 В.

В качестве резистивной нагрузки  $R_n$  для снятия токовой разрядной характеристики применялся реостат, имеющий омическое сопротивление 6 Ом и максимально допустимый рабочий ток 15 А. Реостат был способен превращать в тепло излишки электроэнергии, вырабатываемой солнечной батареей при полной зарядке накопителя энергии.

Величины зарядных и разрядных токов, протекающих через аккумуляторную и емкостную части накопителя, измерялись двумя цифровыми мультиметрами DT830B с помощью стандартных измерительных шунтов 75ШСМ3-5-0,5 сопротивлением 15000 мкОм. Показания приборов одновременно, каждые 20 с считывались методом фотофиксации.

### Результаты и их обсуждение

Исследована динамика зарядных и разрядных характеристик литий-ионного аккумулятора и блока суперконденсаторов емкостью 40 Ф. Из анализа полученных зарядных характеристик следует:

- скорость заряда, В/с, емкостного накопителя в 24 раза превышает скорость заряда литий-ионного аккумулятора;
- разряженный суперконденсатор представляет собой короткозамкнутую нагрузку для источника электроэнергии, что допустимо для солнечной батареи, но недопустимо для аккумуляторного источника энергии, это необходимо учитывать при схемотехническом решении гибридного накопителя;
- при сравнительно одинаковых массогабаритных параметрах литий-ионного аккумулятора и блока суперконденсаторов первый способен запасать в 74 раза больше энергии (джоулей).

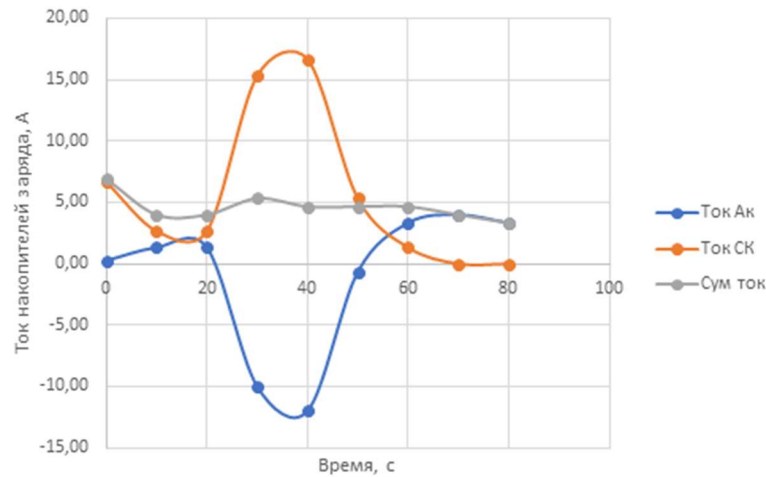
Анализ разрядных характеристик литий-ионного аккумулятора и суперконденсатора показал, что при одинаковом нагрузочном сопротивлении скорость разряда емкостного накопителя в 24 раза превышает скорость разряда литий-ионного аккумулятора. Это говорит о том, что суперконденсаторная часть будет намного более динамично реагировать на просадки напряжения на нагрузке фотоэлектрической системы.

Выбранный метод анализа саморазряда по спаду напряжения показал, что саморазряд суперконденсатора составляет 0,25 В в сутки при нулевом значении этого показателя у литий-ионного аккумулятора. Это говорит о том, что в составе гибридного аккумуляторно-емкостного накопителя суперконденсатор должен иметь значительную емкость для создания запаса по энергии или находиться в состоянии постоянной подзарядки. В таком случае необходим шунтовой регулятор для защиты суперконденсатора от перегрузки по току. После того как суперконденсатор зарядится, энергия источника становится излишней, и регулятор просто

рассеивает ее в виде тепла. Суперконденсатор всегда заряжается до максимально возможного уровня, так как забирает самый большой ток, который только способен отдать источник энергии.

Исследованы токовые зарядные и разрядные характеристики гелевого свинцово-кислотного аккумулятора и блока суперконденсаторов пуско-зарядного устройства INSPECTOR Booster с электростатической емкостью 80 Ф на напряжение 15,5 В, полученные по измерениям токов заряда и разряда в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1.

На рис. 3 приведены зависимости токов аккумулятора, блока суперконденсаторов и алгебраической суммы токов от времени заряда при их параллельном соединении.

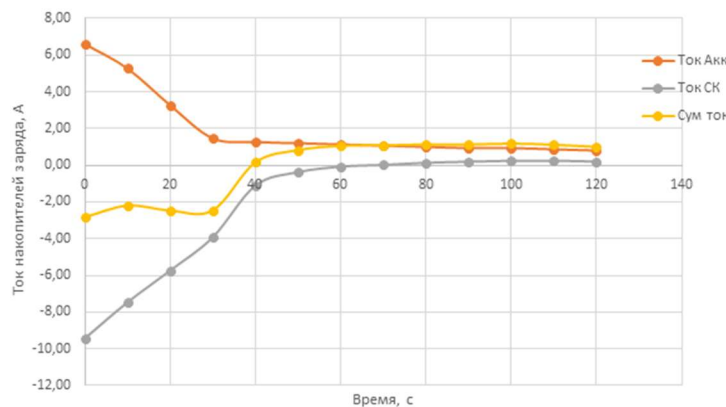


**Рис. 3.** Зависимости токов в гибридном накопителе энергии от времени заряда  
**Fig. 3.** Current dependences from the charging time in a hybrid energy storage device

Поведение зарядных токов в гибридном накопителе с параллельным соединением аккумуляторной и емкостной его частей можно объяснить следующим образом:

- параллельное соединение аккумулятора и суперконденсатора создает замкнутый контур из двух потребителей энергии с различным внутренним сопротивлением, на начальной стадии заряда, зарядные токи от солнечной батареи в них текут в одинаковом направлении;
- из-за более низкого внутреннего сопротивления и более высокой скорости заряда суперконденсатор начинал разряжать аккумулятор, одновременно потребляя зарядный ток от солнечной батареи, при этом ток в аккумуляторе меняет направление на противоположное – с зарядного на разрядное;
- интересно, что общий ток накопителя, равный алгебраической сумме токов в аккумуляторе и суперконденсаторе, на протяжении цикла заряда остается равным току заряда, поступающему от солнечной батареи.

На рис. 4 приведены временные зависимости разрядных токов аккумуляторной, емкостной частей и гибридного накопителя в целом.



**Рис.4.** Зависимости токов в гибридном накопителе энергии от времени разряда  
**Fig. 4.** Current dependences from the discharging time in a hybrid energy storage device

Как видно из приведенных графиков, разрядный ток суперконденсаторного блока на начальной стадии в 1,5 раз выше разрядного тока аккумулятора, причем эти токи имеют противоположное направление. Общий ток разряда накопителя определялся алгебраической суммой токов разряда аккумулятора и суперконденсатора и был равен току в нагрузке, контролируемому ШИМ-контроллером.

### Заключение

Несмотря на многочисленные исследования и кажущуюся простоту схемотехнического решения гибридного накопителя параллельным соединением аккумуляторной и емкостной частей, до сих пор не существует единого подхода по его практической реализации. Экспериментальные исследования зарядно-разрядных характеристик аккумуляторно-емкостного накопителя электроэнергии проводились в составе автономной фотоэлектрической системы при естественном солнечном облучении. Исследована динамика зарядных и разрядных процессов литий-ионного аккумулятора и блока суперконденсаторов емкостью 40 Ф. Из проведенного анализа зарядных характеристик следует, что скорость заряда, В/с, емкостного накопителя в 24 раза превышает скорость заряда литий-ионного аккумулятора. Разряженный суперконденсатор представляет собой короткозамкнутую нагрузку для источника электроэнергии, что вполне допустимо для солнечной батареи, но недопустимо для аккумуляторного источника энергии. Это необходимо учитывать при схемотехническом решении гибридного накопителя. При сравнительно одинаковых массогабаритных параметрах литий-ионного аккумулятора и блока суперконденсаторов, первый способен запастись в 74 раза больше энергии (джоулей). Анализ разрядных характеристик литий-ионного аккумулятора и суперконденсатора показал, что при одинаковом нагрузочном сопротивлении скорость разряда емкостного накопителя в 24 раза превышает скорость разряда литий-ионного аккумулятора. Это говорит о том, что суперконденсаторная часть по сравнению с аккумуляторной будет намного более динамично реагировать на просадки напряжения на нагрузке фотоэлектрической системы. Выбранный метод анализа саморазряда по спаду напряжения показал, что саморазряд суперконденсатора составляет 0,25 В в сутки при практически нулевом значении этого показателя у литий-ионного аккумулятора. Это говорит о том, что в составе гибридного аккумуляторно-емкостного накопителя суперконденсатор должен иметь значительную емкость для создания запаса по энергии или находиться в состоянии постоянной подзарядки. Исследованы токовые зарядные и разрядные характеристики гелевого свинцово-кислотного аккумулятора и блока суперконденсаторов пуско-зарядного устройства INSPECTOR Booster с электростатической емкостью 80 Ф на напряжение 15,5 В. Как зарядные, так и разрядные токовые характеристики гибридного накопителя энергии свидетельствуют о нежелательном обмене энергией и инверсии токов при параллельном соединении аккумуляторной и емкостной частей накопителя. Очевидным решением этой проблемы является сбалансированность их энергоемкостей и оптимизация схемы управления автономной фотоэлектрической системой.

### 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. *Сахаровские чтения 2020 года: экологические проблемы XXI века*; г. Минск, Республика Беларусь: в 2 ч. Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та. 2020;(Ч. 2):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(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(Ч. 3);2(56):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);36TVN613:1-13.
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. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2019;23(4):39-48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48.
8. 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.
9. Василевич В.П., Збышинская М.Е. *Суперконденсаторные структуры для накопителей энергии в составе автономной фотоэлектрической системы, гл. 8. Контактно-барьерные структуры субмикронной электроники*. Под ред. А.П. Достанко, В.Л. Ланина. Минск: Бестпринт; 2021.
10. Weingarth D., Foelske-Schmitz A., Kötz R. Cycle versus voltage hold: which is the better stability test for electrochemical double layer capacitors? *Journal Power Sources*. 2013;225:84-88. DOI: 10.1016/j.powsour.2012.10.019.
11. 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. *Journal Power Sources*. 2007;174:264-271. DOI: 10.1016/j.powsour.2007.08.078.
12. Diab Y., Venet P., Gualous H., Rojat G. Self-discharge characterization and modeling of electrochemical capacitor used for power electronics applications. *IEEE Trans Power Electro*. 2009; 24:511–517. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2007116.
13. Lazzari M, Soavi F, Mastragostino M. Dynamic pulse power and energy of ionic-liquid-based supercapacitor for HEV application. *Journal of The Electrochemical Society*. 2009;156: A661–A666. DOI: 10.1149/1.3139046.
14. Mars P. Coupling a supercapacitor with a small energyharvesting source. *EDN Journal*. June, 2012.
15. Thounthong P., Chunkag V., Sethakul P., Sikkabut S., Pierfederici S., Davat B. Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source. *Journal of Power Sources*. 2011;196(1):313-324.
16. Амброзевич А.С., Сибатов Р.Т., Учайкин В.В., Морозова Е.В. Экспериментальные исследования токов заряда-разряда в суперконденсаторах. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2014;4(32):164-175.

## 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. (In Russ.)
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;(P. 2):393-396. DOI: 10.46646/SAKH-2020-2-393-396. (In Russ.)
3. Berdnikov R.N., Fortov V.E., Son E.E., Den'shchikov K.K., Zhuk K.E., Novikov N.L., Shakaryan 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. (In Russ.)
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(2):137-142. (In Russ.)
5. Marenkov S.A. [Hybrid accumulator of electricity for networks with distributed generation based on renewable sources of electrical energy]. *International Research Journal*. 2017 (P. 3);2(56):120-123. DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.007. (In Russ.)
6. Savrasov F.V. [Variants of the autonomous power supply systems's design with photovoltaic devices and algorithms for their work]. *Naukovedenie*. 2013;(6);36TVN613:1-13. (In Russ.)
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. (In Russ.)

8. 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. (In Russ.)
9. Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y. [*Supercapacitor structures for energy storage as part of stand-alone photovoltaic system, ch. 8. Contact-barrier structures of submicron electronics*]. Ed. A.P. Dostanko, V.L. Lanina. Minsk: Bestprint; 2021. (In Russ.)
10. Weingarth D., Foelske-Schmitz A., Kötz R. Cycle versus voltage hold: which is the better stability test for electrochemical double layer capacitors? *Journal Power Sources*. 2013;225:84-88. DOI: 10.1016/j.powsour.2012.10.019.
11. 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. *Journal Power Sources*. 2007;174:264-271. DOI: 10.1016/j.powsour.2007.08.078.
12. Diab Y., Venet P., Gualous H., Rojat G. Self-discharge characterization and modeling of electrochemical capacitor used for power electronics applications. *IEE Trans Power Electro*. 2009; 24:511–517. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2007116.
13. Lazzari M, Soavi F, Mastragostino M. Dynamic pulse power and energy of ionic-liquid-based supercapacitor for HEV application. *Journal of The Electrochemical Society*. 2009;156: A661–A666. DOI: 10.1149/1.3139046.
14. Mars P. Coupling a supercapacitor with a small energy harvesting source *EDN Journal*. June, 2012.
15. Thounthong P., Chunkag V., Sethakul P., Sikkabut S., Pierfederici S., Davat B. Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source. *Journal of Power Sources*. 2011;196(1):313-324.
16. Ambrozevich S., Sibatov R.T., Uchaykin V.V., Morozova E.V. Experimental Study of Charging-Discharging Currents in Supercapacitors University proceedings. *Volga Region. Physics and mathematics sciences*. 2014;4(32):164-175. (In Russ)

### 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 характеристик и построение графиков, 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 graphics, 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

Vasilevich V.P., Cand. of Sci., Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zbyshinskaya M.Y., Ph.D. student at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники;  
тел. +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