

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ НАКОПИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*Е.В. Жданкин, Д.А. Устинов*

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

В настоящее время основной сложностью широкого использования малой альтернативной энергетики является непостоянство таких источников энергии, как ветер и солнце. Для компенсации непостоянства вырабатываемой мощности применяются аккумуляторные батареи (АКБ). Прямое подключение ветрогенератора и солнечных батарей к аккумуляторным батареям ведет к повышенному износу последних. Постоянно изменяющийся ток заряда АКБ, а также импульсные токи при порывистом ветре негативно сказываются на долговечности АКБ и надежности работы всей системы. В статье рассмотрено имитационное моделирование системы автономного электропитания с накопителем на базе АКБ и суперконденсаторного блока с модулем управления. Получены зависимости изменения мощности аккумуляторной батареи при совместной работе с суперконденсаторным блоком при изменении нагрузки.

*Ключевые слова:* альтернативная энергетика, ВИЭ, ВЭУ, аккумуляторная батарея, суперконденсатор, моделирование.

Одним из ключевых выводов презентации специального обзора Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA) «Дорожная карта ВИЭ (возобновляемых источников энергии) 2030. Перспективы развития возобновляемой энергетики для Российской Федерации», представленной 5 апреля 2017 года в Минэнерго Российской Федерации, является увеличение конечного энергопотребления (TFEC) к 2030 году, согласно «Энергетической стратегии России до 2030 года», приходящееся на долю ВИЭ до 4,9 %. В связи с этим планируется увеличение генерирующих мощностей солнечных, ветровых и геотермальных источников питания до 5,9 ГВт к концу 2024 года [1].

Необходимость использования ВИЭ также отражена в Федеральном законе «Об энергосбережении» и ряде Распоряжений Правительства Российской Федерации, среди которых особо обозначены необходимость интенсивного использования ВИЭ для энергоснабжения объектов на Крайнем Севере и необходимость развития малой энергетики на ВИЭ для замещения локальной дизельной генерации [2–4].

Основной сложностью широкого использования малой альтернативной энергетики является непостоянство таких источников энергии, как ветер и солнце. Для компенсации непостоянства вырабатываемой мощности применяются накопители энергии в виде аккумуляторных батарей.

Недостатком данного решения является прямое подключение ветрогенератора и солнечных батарей к аккумуляторным батареям, которое приводит к повышенному износу последних. Постоянно изменяющийся ток заряда АКБ, а также импульсные токи при порывистом ветре негативно сказываются на долговечности АКБ. В связи с особенностями переходных процессов, происхо-

дящих в аккумуляторах, в частности, за счет плавности изменения ЭДС на электродах и высокого внутреннего сопротивления, АКБ не могут накопить импульсные заряды, а также выдать высокий выходной ток в начальный момент из-за падения напряжения. К тому же, резко переменные нагрузки и токи заряда ведут к деградации АКБ [5].

Поэтому в настоящее время существует необходимость совершенствования системы накопителей электроэнергии, в которых будет учтены особенности работы АКБ [6]. Решением данной проблемы может являться внедрение суперконденсаторного блока [7–9] параллельно с АКБ, через модуль управления.

Целью внедрения суперконденсаторного блока является использование его способности быстрой зарядки/разрядки для снижения стресса на батарею из-за мгновенных перепадов мощности. Однако параллельное включение батареи и суперконденсаторного блока не позволяет добиться требуемого результата [10, 11]. Управление накопителем электрической энергии позволит включать в работу суперконденсаторный блок при кратковременных провалах напряжения, для снижения пиковых токов на АКБ, тем самым увеличивая ее срок службы. В свою очередь, аккумуляторная батарея вступает в работу при длительных провалах напряжения [12].

На рис. 1 приведена принципиальная схема системы автономного электропитания с накопителем на базе АКБ и суперконденсаторного блока с модулем управления. Данная система состоит из источника, нагрузки, выпрямителя, инвертора, управляющего звена, двух DC/DC преобразователей, через которые суперконденсаторный модуль и аккумуляторная батарея подключены к вставке постоянного тока.

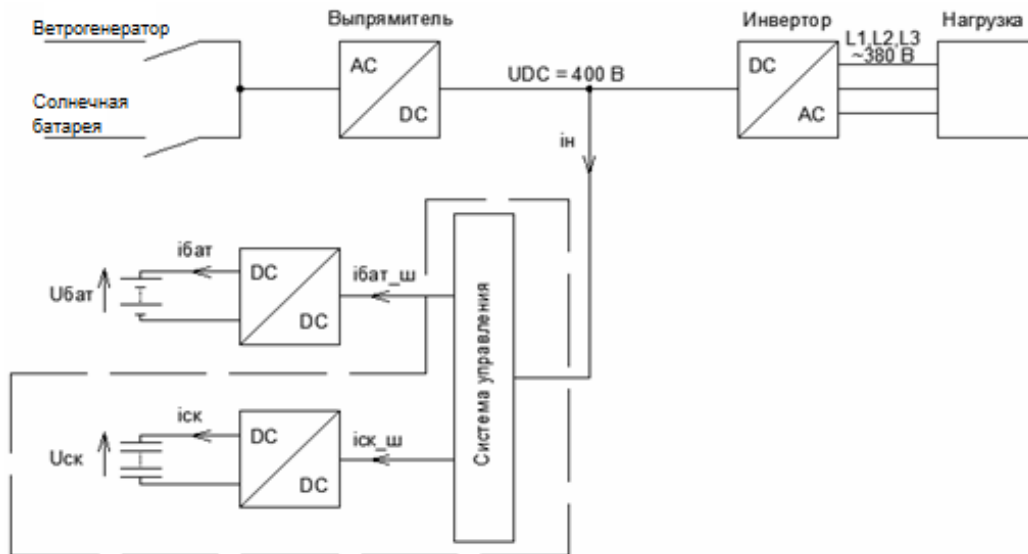


Рис. 1. Активная система

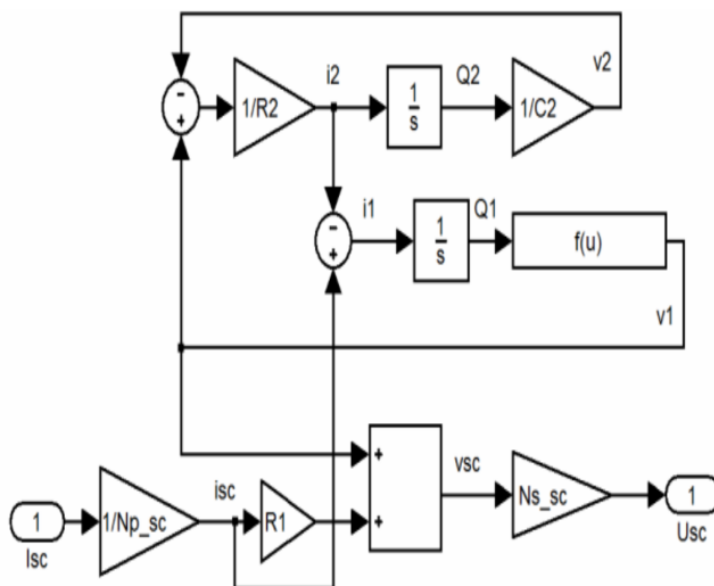


Рис. 2. Компьютерная модель суперконденсатора

Компьютерная модель суперконденсаторного блока была построена в программе MATLAB с расширением Simulink [13, 14] и представлена на рис. 2.

На рис. 3 представлены результаты моделирования суперконденсатора [15, 16].

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что выбранная модель суперконденсатора с хорошей точностью описывает его реальные характеристики.

Моделирование химических источников тока, таких как АБ, значительно сложнее, нежели моделирование суперконденсатора, поскольку разрядная кривая АБ определяется большим количеством параметров (температура, степень зарядки, глубина разрядки и т. п.). В данном исследовании будет использована модель АБ, определение параметров

которой основано только на заводской кривой разрядки [17, 18]. Пример данной кривой приведен на рис. 4.

Главным достоинством этой модели является то, что для определения параметров модели необходимо знать только три точки на данной кривой. Точка полной зарядки батареи ( $U_{полн}$ ), точка окончания экспоненциальной зоны ( $U_{экс}$ ,  $Q_{экс}$ ) и точка окончания номинальной зоны ( $U_{ном}$ ,  $Q_{ном}$ ). По данным точкам определяются коэффициенты в следующем уравнении, описывающем напряжение на батарее в зависимости от времени и тока разрядки:

$$U_{бат} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} (it) - R_{бат} i + A e^{-Bit} - K \frac{Q}{Q-it} i^*, \quad (1)$$

## Альтернативные источники энергии

где  $E_0$  – постоянное ЭДС батареи (В);

$K$  – постоянная поляризации (В/А·ч) или сопротивление поляризации (Ом);

$Q$  – емкость батареи (А·ч);

$it = \int idt$  – мгновенное значение заряда батареи (А·ч);

$A$  – значение напряжения в экспоненциальной зоне (В);

$B$  – обратная постоянная времени экспоненциальной (1/А·ч);

$R$  – внутреннее сопротивление (Ом);

$i$  – мгновенное значение тока (А);

$i^*$  – мгновенные значения низкочастотных составляющих тока (А).

Для моделирования аккумуляторной батареи VISIOCP1270 использована характеристика разрядки из технических данных производителя [17, 18]. Моделирование производилось в программе MATLAB с расширением Simulink.

На рис. 5 представлены результаты моделирования АКБ VISIOCP1270 для трех различных токов разрядки.

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что выбранная модель с хорошей точностью описывает его реальные характеристики.

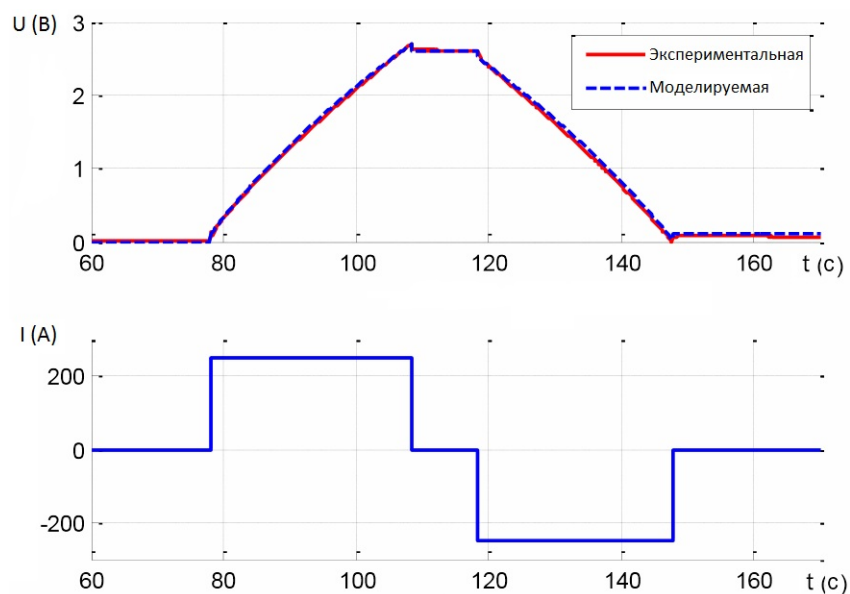


Рис. 3. Результаты моделирования СКМ

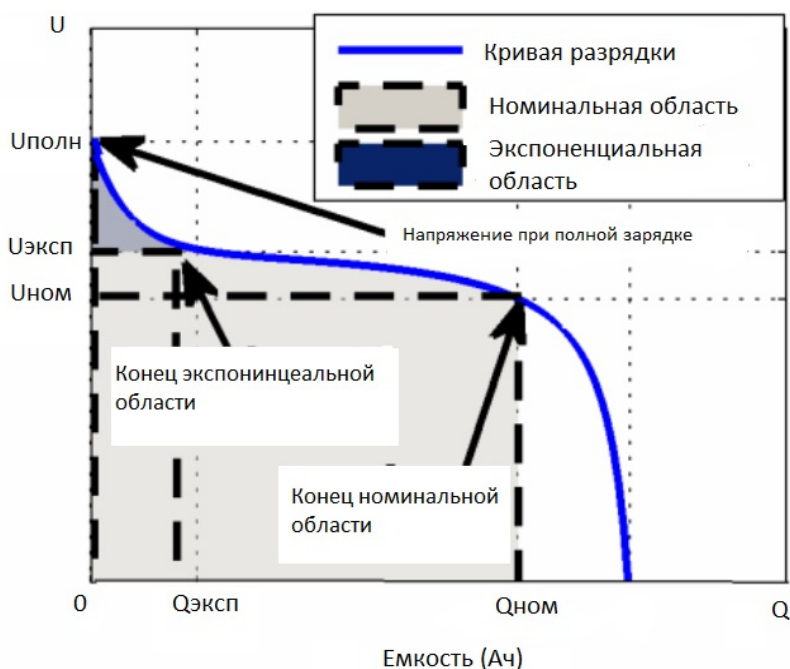


Рис. 4. Кривая разрядки аккумуляторной батареи

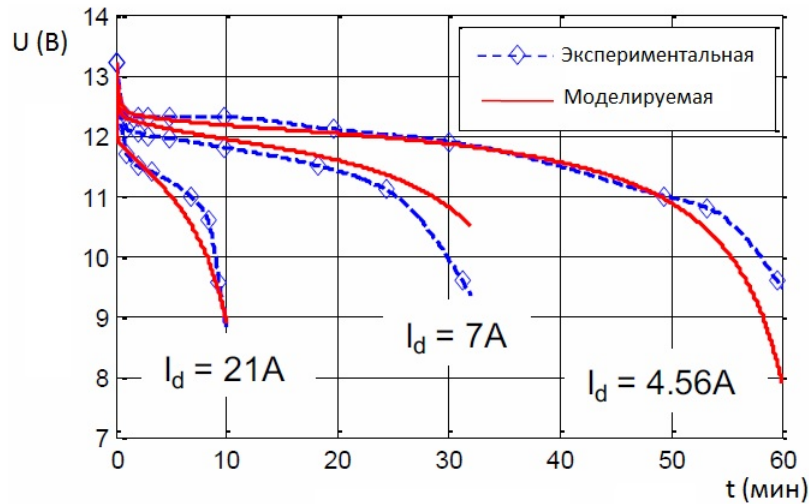


Рис. 5. Результаты моделирования АКБ VISIOCP1270

Компьютерная модель активной системы накопления электрической энергии, приведенная на рис. 6, была построена в программе MATLAB с расширением Simulink.

На рис. 7 и 8 приведены графики, полученные в результате моделирования системы.

Из полученных зависимостей видно, что применение управляемой системы накопления электрической энергии позволяет сгладить пиковые токи на АКБ и обеспечить управляемый процесс заряда и разряда суперконденсаторного блока. Из результатов моделирования видно, что приме-

нение суперконденсаторного блока в составе системы автономного электропитания с применением накопителя на базе АКБ и суперконденсаторов позволяет улучшить характеристики системы за счет увеличения срока службы аккумуляторных батарей, то есть система с активным управлением накопителем электрической энергии позволяет увеличить срок службы и стабильность работы АКБ, и за счет быстродействия и высокой удельной мощности суперконденсатора позволяет накапливать энергию даже при импульсном характере генерации энергии от ВИЭ.

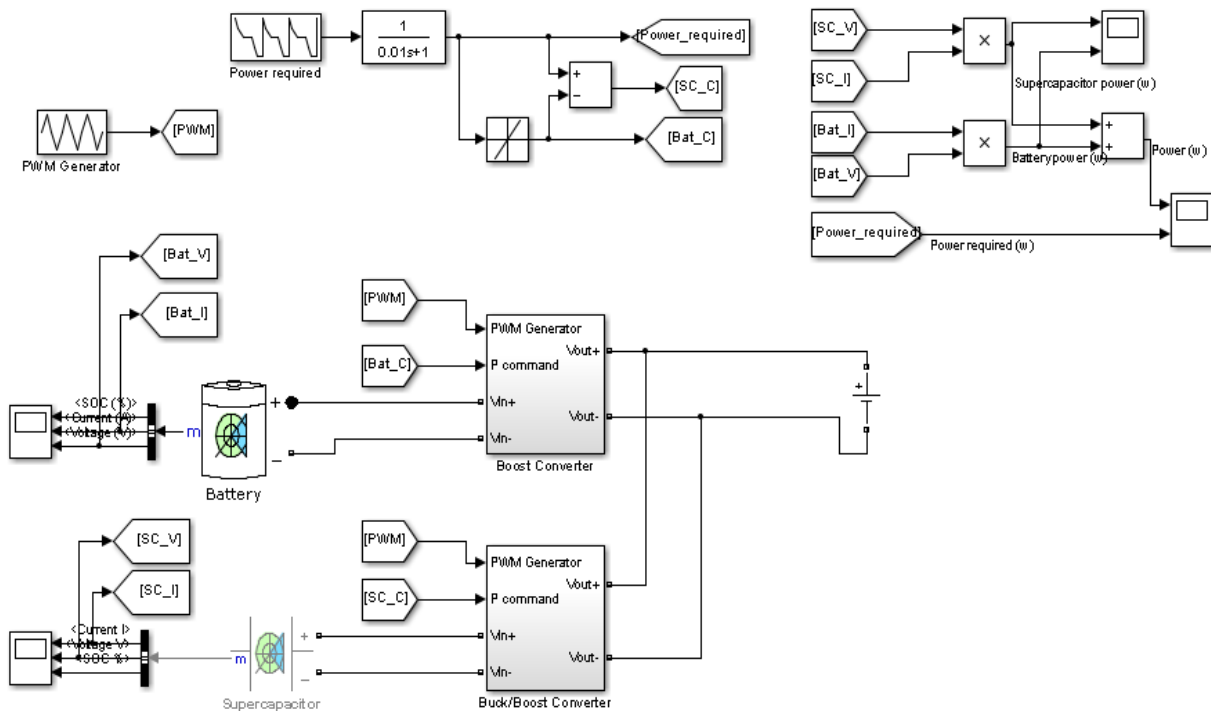


Рис. 6. Компьютерная модель активной накопительной системы

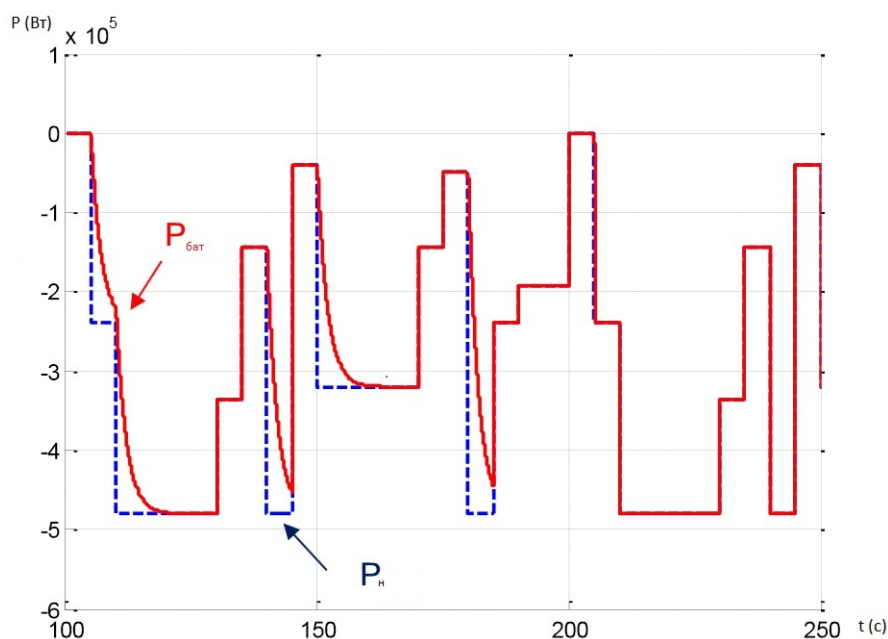


Рис. 7. Зависимость мощности батареи от времени

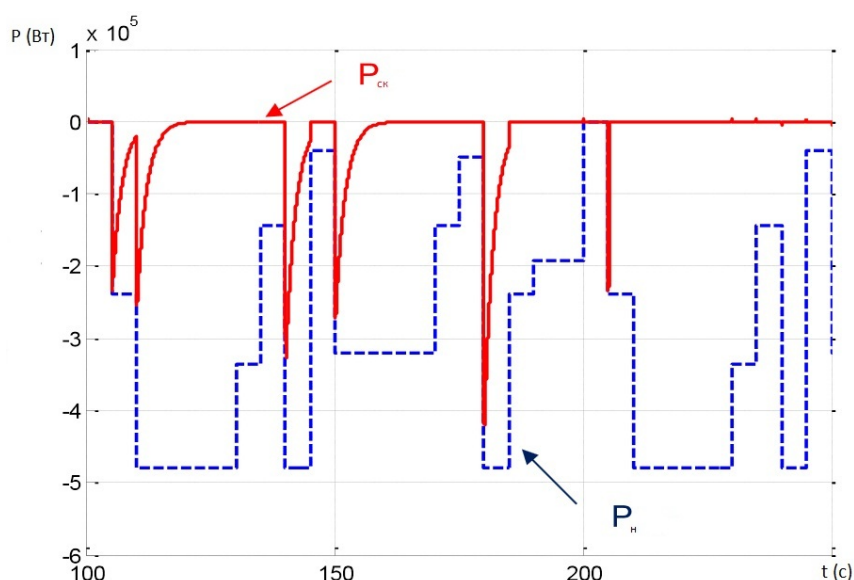


Рис. 8. Зависимость мощности суперконденсаторного модуля от времени

### Литература

1. Irena: Renewable Energy Prospects for the Russian Federation (REmap working paper). – <http://www.irena.org/publications/2017/Apr/Renewable-Energy-Prospects-for-the-Russian-Federation-REmap-working-paper> (дата обращения: 04.10.2018).

2. Распоряжение Правительства № 1–р «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года». – 08.01.2009.

3. Распоряжение Правительства РФ №1234–р

«Энергетическая стратегия России на период до 2020 года». – 28.08.2003.

4. Федеральный закон РФ №42–ФЗ «Об энергосбережении». – 05.04.2003.

5. Пентегов, И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии / И.В. Пентегов. – Киев: Наукова думка, 1982. – 424 с.

6. Климов, В.П. Топологии источников бесперебойного питания переменного тока / В.П. Климов, А.А. Портнов, В.В. Зуенко // Электронные компоненты. – 2003. – № 7. – С. 12–16.

7. Francesco Lufrano. A Bibliometric Analysis of the International Literature in Supercapacitors /

Francesco Lufrano, Pietro Staiti // *International Journal. Electrochem. Science.* – 2009. – No. 4. – P. 173–186.

8. Кузнецов, В. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. Кузнецов, О. Панькина // *Компоненты и технологии.* – 2005. – № 6. – С. 12–16.

9. Kuldeep Sahay. *Supercapacitors Energy Storage System for Power Quality Improvement: An Overview* / Kuldeep Sahay, Bharti Dwivedi // *Journal of Electrical Systems.* – 2009. – 5(4).

10. Control strategy for optimal combination of supercapacitor and battery in 500 kVA rated UPS / Amine Lahyani, Pascal Venet, AlaaTrouidi, Abdessattar Guermazi // *International journal of Electronics and Engineering.* – 2012. – No. 6. – P. 96–108.

11. Григораш, О.В. Нетрадиционные источники электроэнергии в составе систем гарантированного электроснабжения / О.В. Григораш, Н.И. Богатырев, Н.Н. Курзин // *Промышленная энергетика.* – 2004. – № 1. – С. 59–62.

12. Burnett, M.B. *Component sizing for a power system combining batteries and supercapacitors in solar/hydrogen hybrid electric vehicle* / M.B. Burnett, L.J. Borle // *Proc. IEEE Conf. Veh. Power Propuls.* – 2005. – P. 711–714. DOI: 10.1109/VPPC.2005.1554636

13. Герман-Галкин, С.Г. *Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие* / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона Принт, 2010. – 320 с.

14. Черных, И.В. *Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink* / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с. DOI: 10.1007/978-3-642-24201-4

15. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Р.Н. Бердников, В.Е. Фортов, Э.Е. Сон и др. // *Энергия единой сети.* – 2013. – № 2 (7). – С. 40–51.

16. Dougal, R.A. *Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids* / R.A. Dougal, S. Liu, and R.E. White // *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on.* – 2002. – Vol. 25, no. 1. – P. 120–131. DOI: 10.1109/6144.991184

17. Таганова, А.А. *Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: справ.* / А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов. – СПб.: Химиздат, 2005. – 264 с.

18. Варыпаев, В.Н. *Химические источники тока* / В.Н. Варыпаев, М.А. Дасоян, В.А. Никольский. – М.: Высшая школа, 2000. – 280 с.

**Жданкин Егор Викторович**, аспирант кафедры «Электроэнергетика и электромеханика», Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; egorrr31@mail.ru.

**Устинов Денис Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электромеханика», Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; bescheiden@rambler.ru.

Поступила в редакцию 6 октября 2018 г.

DOI: 10.14529/power180406

## IMITATION MODELING OF ACTIVE ELECTRICITY STORAGE SYSTEM

**E.V. Zhdankin**, egorrr31@mail.ru,

**D.A. Ustinov**, bescheiden@rambler.ru

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Currently, the main challenge preventing the wide-scale use of small alternative energy generating unit, is the variability of such energy sources as wind and sun. Rechargeable batteries, accumulating energy, are used to compensate for the variability of the generated power. The direct connection of the wind generator and solar panels to batteries leads to the increased wear of the latter. Constantly varying battery charge current, as well as pulse currents generated by gusty winds, negatively impact the battery durability and the reliability of the entire system. The article describes the simulation of a system with a storage based on a super-capacitor unit and a battery with a control module. The dependences of the battery energy are obtained for the cases using a supercapacitor unit when the load changes.

*Keywords: alternative energy, renewable energy sources, wind turbines, rechargeable battery, supercapacitor, simulation.*

## References

1. Irena: *Renewable Energy Prospects for the Russian Federation* (REmap working paper). Available at: <http://www.irena.org/publications/2017/Apr/Renewable-Energy-Prospects-for-the-Russian-Federation-REmap-working-paper> (accessed 04.10.2018)
2. *Rasporyazheniye Pravitel'stva № 1–r "Osnovnyye napravleniya gosudarstvennoy politiki v sfere povysheniya energeticheskoy effektivnosti elektroenergetiki na osnove ispol'zovaniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii na period do 2020 goda"* [Government Decree No. 1 – p "The Main Directions of the State Policy in the Field of Increasing the Energy Efficiency of the Electric Power Industry through the Use of Renewable Energy Sources for the Period up to 2020]. 08.01.2009.
3. *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF № 1234–r "Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2020 goda"* [Order of the Government of the Russian Federation No. 1234– p "Energy Strategy of Russia for the Period until 2020]. 28.08.2003.
4. *Federal'nyy zakon RF № 42–FZ "Ob energosberezhenii"* [Federal Law of the Russian Federation No. 42– FZ "On Energy Saving"]. 05.04.2003.
5. Pentegov I.V. *Osnovy teorii zaryadnykh tsepey emkostnykh nakopiteley energii* [Fundamentals of the Theory of Charging Circuits of Capacitive Energy Storage]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982. 424 p.
6. Klimov V.P., Portnov A.A., Zuyenko V.V. [Uninterruptible Power Supply AC Topologies]. *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components], 2003, no. 7, pp. 12–16. (in Russ.)
7. Francesco Lufano, Pietro Staiti [A Bibliometric Analysis of the International Literature in Supercapacitors]. *International Journal Electrochem. Science*, 2009, no. 4, pp. 173–186.
8. Kuznecov V., Pan'kina O. [Electric Double Layer Capacitors (Ionistors): Design and Production]. *Components and Technologies*, 2005, no. 6, pp. 12–16. (in Russ.)
9. Kuldeep Sahay, Bharti Dwivedi. Supercapacitors Energy Storage System for Power Quality Improvement: An Overview. *Journal Electrical System*, 2009, 5 (4).
10. Amine Lahyani, Pascal Venet, AlaaTrouidi, Abdessattar Guermazi. Control Strategy for Optimal Combination of Supercapacitor and Battery in 500 kVA Rated UPS. *International Journal of Electronics and Engineering*, 2012, no. 6, pp. 96–108.
11. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N. [Unconventional Sources of Electricity as Part of Uninterrupted Power Supply Systems]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Electronics], 2004, no. 1, pp. 59–62. (in Russ.)
12. Burnett M.B., Borle L.J. Component Sizing for a Power System Combining Batteries and Supercapacitors in Solar/Hydrogen Hybrid Electric Vehicle. *Proc. IEEE Conf. Veh. Power Propuls.*, 2005, pp. 711–714. DOI: 10.1109/VPPC.2005.1554636
13. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0* [Computer Simulation of Semiconductor Systems in MATLAB 6.0. Tutorial]. St. Petersburg, Korona Print, 2010. 320 p.
14. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Piter, 2008. 288 p. DOI: 10.1007/978-3-642-24201-4
15. Berdnikov R.N., Fortov V.E., Son E.E., Den'shchikov K.K., Zhuk A.Z., Shakaryan Yu.G. [Hybrid Electricity Storage for the UNEN on the Basis of Batteries and Supercapacitors]. *Energiya edinoy seti* [Energy of United Network], 2013, no. 2 (7), pp. 40–51. (in Russ.)
16. Dougal R.A., Liu S., White R.E. Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids. *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, 2002, vol. 25, no. 1, pp. 120–131. DOI: 10.1109/6144.991184
17. Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S.B. *Germetichnye khimicheskie istochniki toka: Elementy i akkumulyatory. Oborudovanie dlya ispytaniy i ekspluatatsii* [Sealed Chemical Current Sources: Cells and Batteries. Testing and Operation Equipment. Directory]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2005. 264 p.
18. Varypaev V.N., Dasoyan M.A., Nikol'skiy V.A. *Khimicheskie istochniki toka* [Chemical Current Sources]. Moscow, High School Publ., 2000. 280 p.

Received 6 October 2018

## ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Жданкин, Е.В. Имитационное моделирование активной накопительной системы / Е.В. Жданкин, Д.А. Устинов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 52–58. DOI: 10.14529/power180406

## FOR CITATION

Zhdankin E.V., Ustinov D.A. Imitation Modeling of Active Electricity Storage System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 52–58. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180406