

УДК 620.97;621.31;681.518

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ В РЕАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Дубинин Дмитрий Владимирович,**

канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и защиты информации  
Томского университета систем управления и радиоэлектроники, Россия,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: dima@info.tusur.ru

**Лаевский Виктор Евгеньевич (V. Geringer),**

канд. техн. наук, зав. лаб. «Регенеративные источники энергии и автомобильная электроника» Государственного объединенного университета  
Баден-Вюртемберг, Германия, D-88045, Friedrichshafen, Fallenbrunnen 2.  
E-mail: geringer@dhbw-ravensburg.de

*В настоящее время широкое применение находят системы преобразования солнечной энергии в электричество. Солнце обладает практически безграничными ресурсами. Солнечная энергия общедоступна. Разработка и производство систем преобразования солнечной энергии в электричество является наиболее перспективным и активно развиваемым направлением создания экологически чистых регенеративных источников энергии.*

**Цель работы.** Для сравнения технических характеристик батарей различных производителей в реальных условиях эксплуатации на кафедре регенеративных источников энергии в Baden-Württemberg Cooperative State University, Department of Engineering, Campus Friedrichshafen спроектирован и реализован системный комплекс «Photovoltaic Research System». Этот комплекс позволил сравнить энергетическую эффективность стационарно установленных элементов с аналогичными панелями, находящимися на платформе двухосевой системы автоматического слежения за углом стояния Солнца.

**Методы исследования.** Исследования производились с использованием информационных систем SolarLog и SolarEdge, позволяющих производить считывание, обработку и накопление экспериментальных данных непосредственно с фотоэлектрических преобразователей. Обработка и проверка результатов производилась в средах MathCAD и MS Excel. Использовались методы статистической обработки информации.

**Результаты.** Результаты, полученные за период с января по март 2014 г., позволили рассмотреть эффективность работы солнечных батарей различных фирм производителей и привести оценки эффективности размещения солнечных панелей на платформе двухосевой системы автоматического слежения («DEGERtraker 5000HD») за углом стояния Солнца по сравнению со стационарным положением. Показано влияние эффектов затенения на стационарно установленные модули. Получены оценки себестоимости электроэнергетики, обобщены результаты обработки статистических данных.

### **Ключевые слова:**

*Возобновляемые источники энергии, солнечная батарея, выходная мощность, энергетическая эффективность, себестоимость электроэнергии, солнечная энергия.*

### **Актуальность проблемы**

В настоящее время широкое применение находят системы преобразования солнечной энергии в электричество [1–3]. Разработка таких систем является наиболее перспективным и активно развиваемым направлением [4–8] создания экологически чистых регенеративных источников энергии. За последние пять лет прирост электроэнергии, выработанной за счет преобразования солнечной энергии, составил 50 %. По экспертным оценкам общая мощность солнечной генерации в мире составляет 100 ГВт на конец 2012 г. [9]. В этой области Российская Федерация многократно отстает от европейских стран. Для стимулирования развития в России возобновляемой энергетики правительство приняло пакет документов, что должно привлечь в эту сферу инвесторов.

Для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую используется явление фотоэффекта. У фотоэлектрических установок коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую относительно небольшой [10–12]. В настоящее время он составляет 13–18 % для солнеч-

ных батарей массового производства. Суммарная эффективность большинства промышленных солнечных полупроводниковых систем электроснабжения не превышает 8–12 % [13, 14]. Предпринимаются попытки увеличения коэффициента преобразования в лабораторных условиях. В настоящий момент достигнута величина 24 % для лучших лабораторных образцов [15, 16].

Стоимость электроэнергии, выработанной солнечными батареями, ежегодно снижается. За 2011 г. снижение составило 50 %, а с 2008 г. падение составило 75 %. Если на начало 2007 г. себестоимость 1 Вт составляло для разных типов фотоэлементов 3–4 \$, то в 2013 г. цена киловатт-часа в регионах с большим количеством Солнца составила менее 0,1 EUR.

В связи с этим на базе кафедры регенеративных источников энергии (Faculty of Engineering/Studentengang TEU/Solar Research Laboratory) в городе Фридрихсхафен был создан системный комплекс тестирования солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации с целью сопоставления характеристик, создания компьютерных моделей,

проведения анализа энергетической эффективности стационарно установленных элементов с аналогичными панелями, находящимися на платформе двухосевой системы автоматического слежения за углом стояния Солнца, а также исследования процессов и создания моделей потери производительности батарей за счёт процессов старения.

#### Краткое техническое описание комплекса

Исследуемые солнечные панели были разделены на две группы. Первая группа солнечных батарей состоит из 40 панелей, расположенных на крыше здания лаборатории (первый пункт наблюдения). Конструкция позволяет изменять наклон батарей к плоскости крыши. Всего возможны шесть фиксированных положений угла наклона: от 10 до 60 градусов.

Вторая группа солнечных батарей размещена на платформе двухосевой системы автоматического слежения фирмы «DEGERenergie GmbH» (второй пункт наблюдения). Система «DEGERtraker 5000HD» позволяет сохранять положение Солнца на нормали плоскости несущей платформы. Сектор поворота платформы по азимуту составляет 300 градусов, по углу места – от 20 до 90 градусов. Максимальная площадь несущей платформы составляет 43,5 м<sup>2</sup>. В течение года система слежения «DEGERtraker 5000HD» потребляет 8 кВт·ч электроэнергии. Общий вид комплекса показан рис. 1 [17].

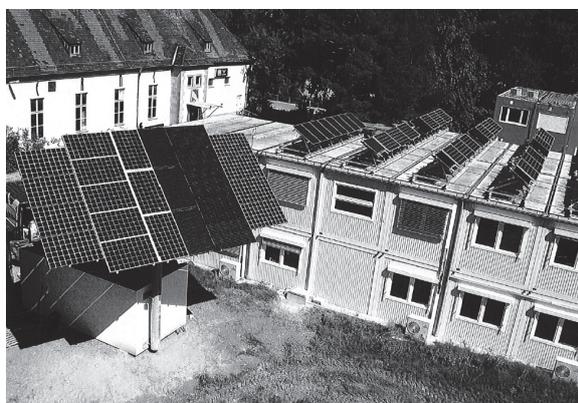


Рис. 1. Внешний вид системного комплекса

Fig. 1. System complex exterior

В составе системного комплекса используются широко распространенные в Европе солнечные батареи: SW270 MONO фирмы Solar World, LG280N1C фирмы LG, SI M 60 260 фирмы Bosch, 255 W 60M фирмы Asola, SF220 245W фирмы Hanwha, KD245GH-4YB2 фирмы Kyocera, REC245PE фирмы REC, UF L 95-115 фирмы Q.Cells.

Такой набор позволяет проводить разнообразные исследования [17] различных технологий создания солнечных батарей [18–20]: изготовленных из монокристаллического кремния (панели фирм SolarWorld, LG, Bosch, Asola), мультикристалли-

ческого кремния (панели фирм Hanwha, Kyocera, REC), а также тонкоплёночные фотоэлектрические преобразователи фирмы Q.Cells.

#### Результаты обработки статистических данных

В данной работе изучалась эффективность размещения солнечных панелей на рабочей поверхности следящей системы «DEGERtraker 5000HD» по сравнению с их размещением на крыше лаборатории. Для этого были выбраны солнечные панели LG280N1C фирмы LG, SI M 60 260 фирмы Bosch, 255 W 60M фирмы Asola, поскольку они расположены в обоих пунктах наблюдения. Из двенадцати экземпляров каждого образца четыре установлены на крыше лаборатории, а остальные – на рабочей поверхности следящей системы. Количество энергии, выработанной каждым модулем, измерялось информационной системой Solar Edge. Полученные данные усреднялись для каждого типа батарей, установленных в первом и во втором пунктах наблюдения. Сбор данных о выработке электроэнергии солнечными панелями проводился в течение первого квартала 2014 г.

На рис. 2. приведены данные о среднем значении электроэнергии  $W_{кр}$ , выработанной одним модулем различных фирм, установленным в первом пункте наблюдения, за период с января по март 2014 г. Угол стояния панелей на крыше составлял 60 градусов к линии горизонта.

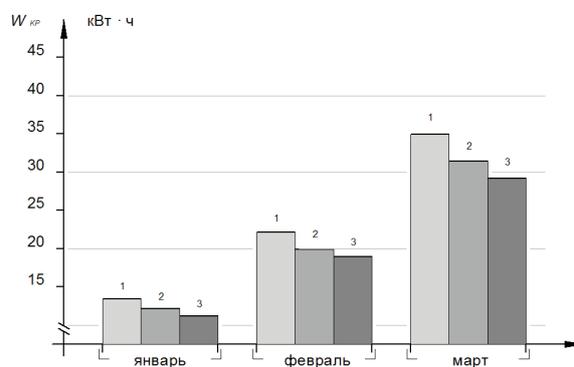


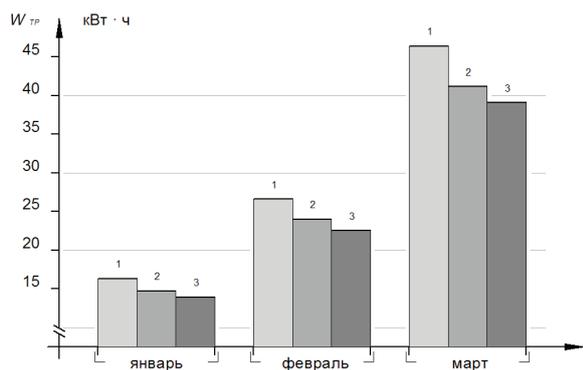
Рис. 2. Среднее значение электроэнергии  $W_{кр}$ , выработанной одним модулем LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) за период с января по март 2014 г.

Fig. 2. Average value of electric energy  $W_{кр}$  generated by one module LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014

Аналогичные солнечные панели, установленные на двухосевой платформе системы слежения «DEGERtraker 5000HD», за тот же период времени выработали несколько больше энергии  $W_{тр}$ . Эти данные приведены на рис. 3. Рост выработки электроэнергии объясняется работой следящей системы наведения.

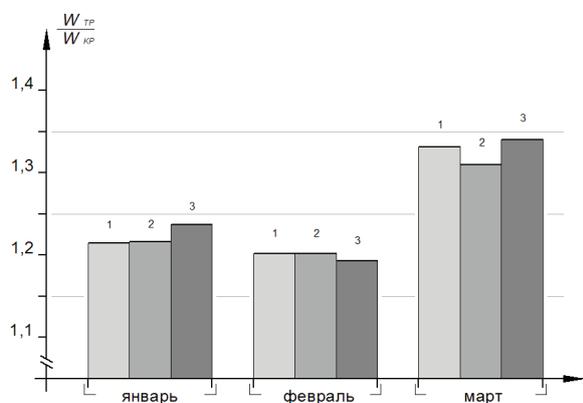
Общий анализ полученных данных показал, что в январе эффективность выработки энергии на платформе двухосевой системы автоматического слежения превышала на 22 % выработку электроэнергии панелями, стационарно установленными

на крыше. В феврале эффективность выработки энергии на платформе двухосевой системы снизилась на 2 % и превысила на 20 % энергию, полученную стационарно установленными панелями. В марте система автоматического слежения позволила получить выигрыш энергии на уровне 33 % по сравнению со стационарно установленными панелями. А средняя эффективность системы слежения за весь временной период наблюдения составила 25 %. На рис. 4. показано отношение энергий  $W_{TP}$  к  $W_{KP}$  для солнечных панелей каждого вида за период наблюдения.



**Рис. 3.** Среднее значение электроэнергии  $W_{TP}$ , выработанной одним модулем LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) за период с января по март 2014 г.

**Fig. 3.** Average value of electric energy  $W_{TP}$  generated by one module LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014

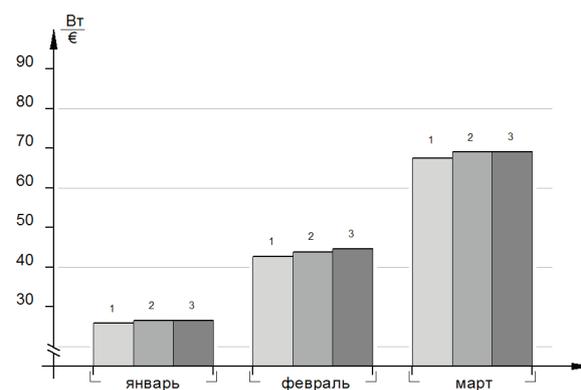


**Рис. 4.** Отношение значений  $W_{TP}$  к  $W_{KP}$  для модулей LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) за период с января по март 2014 г.

**Fig. 4.** Ratio of  $W_{TP}$  to  $W_{KP}$  for modules LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014

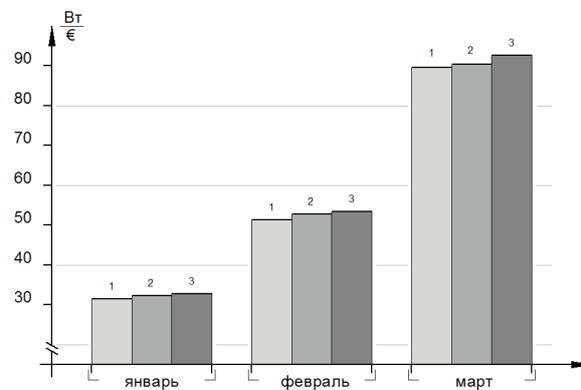
Как видно из рис. 2, 3 больше энергии выработал модуль LG280N1C. Выигрыш составляет 10–12 % по сравнению с модулем SI M 60 260 и 17–20 % по сравнению с модулем 255 W 60M. Солнечные панели всех видов имеют практически одинаковые площади рабочей поверхности, но отличаются ценой. Поэтому представляет интерес себестоимость электроэнергии, определяемая как отношение среднего значения выработанной энергии

к стоимости панели. Данная величина характеризует окупаемость инвестиций. На рис. 5 для всех солнечных батарей приведены данные о себестоимости электроэнергии для модулей, установленных на крыше лаборатории. Аналогичные данные для модулей, размещенных на платформе следящей системы «DEGERtraker 5000HD», приведены на рис. 6. Графики показывают, что для всех типов панелей себестоимость электроэнергии практически одинаковая.



**Рис. 5.** Себестоимость электроэнергии, выработанной солнечными батареями LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3), за период с января по март 2014 г. в первом пункте наблюдения

**Fig. 5.** Cost of electricity generated by solar batteries LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014 in the first observation point



**Рис. 6.** Себестоимость электроэнергии, выработанной солнечными батареями LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3), за период с января по март 2014 г. во втором пункте наблюдения

**Fig. 6.** Cost of electricity generated by solar batteries LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014 in the second observation point

Следует заметить, что при выработке электроэнергии солнечными панелями, установленными на крыше, имел место эффект затенения. Поскольку солнечные батареи были установлены под углом 60 градусов к горизонту, в утреннее время панели первого ряда создавали препятствие для прохождения солнечных лучей к панелям второго, третьего и четвертого рядов. Это привело к некоторому снижению выработки электроэнергии. На рис. 7 приведе-

ны данные о неравномерности выработки электроэнергии за период с января по март. Поскольку эффект затенения не влиял на солнечные батареи первого ряда, они выработали максимальный объем электричества  $W_{\max}$ . Сильнее всего затенение повлияло на батареи, которые были установлены в четвертом ряду. Они выработали наименьшее значение электроэнергии  $W_{\min}$ . Таким образом, отношение  $W_{\max}$  к  $W_{\min}$  характеризует неоднородность выработки электроэнергии одинаковыми солнечными панелями, установленными в разных местах первого пункта наблюдения. Как следует из рис. 7, потери за счет затенения могут достигать 18 %.

### Заключение

В данной работе были представлены данные о выработке электроэнергии из солнечного света панелями LG280N1C, SI M 60 260, 255 W 60M, проведен анализ эффективности работы двухосевой системы автоматического слежения за углом стояния Солнца системы слежения DEGERtraker 5000HD, дана оценка себестоимости электроэнергии. Анализ показал, что использование двухосевой системы автоматического слежения повышает выработку электроэнергии в среднем на 25 %.

Также было изучено влияние затенения одних солнечных батарей другими, получены данные об уровне снижения выработанной электроэнергии вследствие этого эффекта. Потери составили от 7 до 18 %.

Данные исследования требуют продолжения, так как эффективность выработки электроэнергии из солнечного света во втором и третьем кварталах

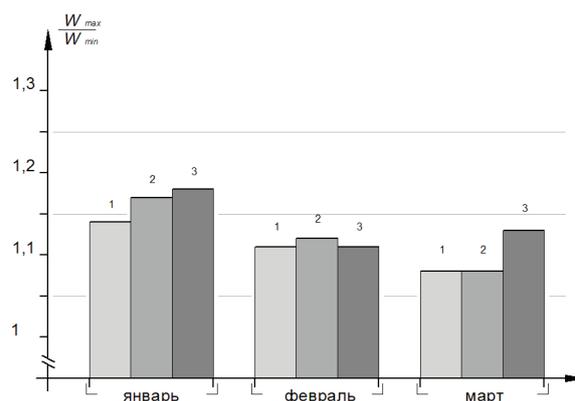


Рис. 7. Влияние взаимного затенения солнечных батарей на снижение выработки электроэнергии для модулей LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) за период с января по март 2014 г. в первом пункте наблюдения

Fig. 7. Influence of inter-shading of solar batteries on decrease of electricity generation for modules LG280N1C (1), SI M 60 260 (2), 255 W 60M (3) from January to March 2014 in the first observation point

возрастает. Кроме того, в стоимости солнечных панелей, установленных на системе слежения, не были учтены затраты на покупку DEGERtraker 5000HD, а в панелях, установленных стационарно, – затраты на систему крепления батарей. Окончательные выводы об энергетической эффективности солнечных батарей в условиях данной местности целесообразно сделать после годового цикла наблюдений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Volker Q. Regenerative Energiesysteme. – München: Carl Hanser Verlag, 2013. – 424 S.
- Wagner A. Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung. – Heidelberg: Springer Verlag, 2010. – 439 S.
- Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2011. – 168 с.
- Саидова Г.К. Альтернативные источники энергии: возможности использования в Узбекистане: аналитический доклад. – Ташкент: Центр экономических исследований, 2011. – 74 с.
- Дураева Е. Возобновляемая энергия в России. От возможности к реальности. – Париж: Изд. ОЭСР/МЭА, 2004. – 124 с.
- Попель О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике // Ж. рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. 52. – № 6. – С. 95–106.
- Фортов В.Е., Макаров А.А. Направления инновационного развития энергетики мира и России // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – № 12. – С. 1337–1353.
- Никитин Д. Трудный путь к солнцу: согреет ли Россию солнечная энергетика // РосБизнесКонсалтинг. 1995–2015. URL: <http://top.rbc.ru/economics/17/06/2013/862008.shtml> (дата обращения: 19.02.2014).
- Gremenok V.F. Thin film solar cells based on Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> // ECOBALTICA'2006: Proceedings of the VI International Youth Environmental Forum / Ed. by M. Fiodorov et al. – Saint-Petersburg, 2006. – P. 24–28.
- Würfel P. Physik der Solarzellen. – Heidelberg: Spektrum Publ., 2000. – 195 S.
- Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. – М.: Мир, 1984. – 472 с.
- Würfel P. Physics of solar cells. From principles to new concepts. – Weinheim: Wiley-VCH Publ., 2005. – 186 p.
- Schünemann C. Photovoltaik // Regenerative Zukunft. URL: <http://www.regenerative-zukunft.de/erneuerbare-energien-menu/photovoltaik> (дата обращения: 25.02.2014).
- Гременок В.Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. – Минск: ИЦ БГУ, 2007. – 222 с.
- Шаповалов В.А., Никитенко Ю.А. Профилированные монокристаллы кремния для солнечной энергетики // Вопросы атомной науки и техники. – 2014. – № 1 (89). – С. 48–52.
- Mahon S. SunPower claims new 23.4 percent solar cell efficiency record // PV-Tech. 2014. URL: [http://www.pv-tech.org/news/sunpower\\_claims\\_new\\_234\\_percent\\_solar\\_cell\\_efficiency\\_record](http://www.pv-tech.org/news/sunpower_claims_new_234_percent_solar_cell_efficiency_record) (дата обращения: 14.02.2014).
- Системный комплекс по исследованию работы солнечных батарей различных производителей в реальных условиях эксплуатации / Д.В. Дубинин, В.Е. Лаевский, В. Поль, Дж. Хайлиг // Электронные средства и системы управления: Матер. докладов IX Междунар. научно-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2013. – С. 140–145.
- Roedem B. Thin film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs / Ed. by B. Roedem // Refocus. – 2006. – V. 7. – № 4. – P. 34–39.
- Jager-Waldau A. R&D roadmap for PV // Thin Solid Films. – 2004. – V. 451. – P. 448–454.
- Photovoltaic materials, history, status and outlook / A. Goetzberger et al. // Material Science and Engineering. – 2003. – V. 40. – P. 1–46.

Поступила 12.04.2014 г.

UDC 620.97;621.31;681.518

## ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR BATTERIES UNDER REAL OPERATING CONDITIONS

Dmitry V. Dubinin,

Cand. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: dima@info.tusur.ru

Viktor Geringer,

PhD, Baden-Wuerttemberg Cooperative State University,  
Campus Friedrichshafen, Fallenbrunnen 2, Friedrichshafen, D-88045, Germany.  
E-mail: geringer@dhbw-ravensburg.de

At the present time solar energy-electricity conversion systems are widely used. Solar energy is widely available while possessing unlimited resources. This direction is the most promising and rapidly developing branch of the environmentally friendly renewable energy sources creation. **The main aim of the study.** Within the framework of comparing the features of the batteries of various manufacturers under actual operating conditions at the Department of renewable energy sources in Baden-Württemberg Cooperative State University, Department of Engineering, Campus Friedrichshafen the authors have designed and realized the system complex PRS which allows analyzing energy efficiency of the fixed, stationary elements with the elements being placed on the platform of the dual-axis system of the sun standing angle auto-tracking.

**The methods used in the study.** The investigations were carried out with the use of Solarlog and SolarEdge systems which allow reading, processing and storing measurement data directly from the respective photovoltaic cells. The data were processed and verified in MathCAD and MS Excel environments. The authors used the methods of information statistical processing.

The results obtained for the period of January–March 2014 allowed considering the efficiency of operation of the solar cell batteries of different manufacturers and evaluating the advantage of placing solar panels on a biaxial system with automatic tracking angle and elevation («DEGERtraker 5000HD») compared to a fixed, stationary system. The influence of shading effects on the fixed modules is demonstrated. In conclusion, the authors obtained the estimates of electricity cost, summarized the results of statistical data processing.

### Key words:

Renewable energy sources, photovoltaic solar battery, output power, power efficiency, electricity charges, solar energy.

### REFERENCES

1. Volker Q. *Renewable Energy Systems* [Regenerative Energiesysteme]. München, Carl Hanser Publ., 2013. 424 p.
2. Wagner A. *Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung* [Photovoltaic Engineering: Handbook for Planning, Development and Application]. Heidelberg, Stringer Publ., 2010. 439 p.
3. Fortov V.E., Popel O.S. *Energetika v sovremennom mire* [Power engineering in the modern world]. Dolgoprudny, Intellect Publ. House, 2011. 168 p.
4. Saidova G.K. *Alternativnye istochniki energii: vozmozhnosti ispolsovaniya v Uzbekistane. Analiticheskiy doklad* [Alternative energy sources: the possibility of using in Uzbekistan. Analytical report]. Tashkent, Centre for Economic Research Publ., 2011. 74 p.
5. Duraeva E. *Vozobnovlyаемая энергия в России. Ot vozmozhnosti k realnosti* [Renewable energy in Russia. From possibility to reality]. Paris, OECD/IEA Publ., 2004. 124 p.
6. Popel O.S. *Vozobnovlyаемые источники энергии: rol i mesto v sovremennoy i perspektivnoy energetike* [Renewable energy: the role and place in modern and future energy]. *Zhurnal rossiyskoy khimii obshchestva D.I. Mendeleeva*, 2008, vol. 52, no. 6, pp. 95–106.
7. Fortov V.E., Makarov A.A. *Napravleniya innovatsionnogo razvitiya energetiki mira i Rosii* [Directions of innovative development of energy in the world and in Russia]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2009, vol. 179, no. 12, pp. 1337–1353.
8. Nikitin D. *Trudny put k solntsu: sogreet li Rossiyu solnechnaya energetika* [Difficult way to the sun: whether the solar power will warm Russia]. *RosBiznesKonsulting*. 1995–2015. Available at: <http://top.rbc.ru/economics/17/06/2013/862008.shtml> (accessed 19 February 2014).
9. Gremenok V.F. *Thin film solar cells based on Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>. Proceedings of the VI International Youth Environmental Forum «ECOBAL-TICA 2006»*. Ed by M. Fiodorov. Saint-Petersburg, 2006. pp. 24–28.
10. Würfel P. *Physik der Solarzellen* [Physics of Solar Cells]. Heidelberg: Spektrum Publ., 2000. 195 p.
11. Ravi K.V. *Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon*. John Wiley & Sons Inc Publ., 1981. 379 p.
12. Würfel P. *Physics of solar cells. From principles to new concepts*. Weinheim, Wiley-VCH Publ., 2005. 186 p.
13. Schönemann C. *Technik und Solarzellenarten* [Technology and solar cell types]. Available at: <http://www.regenerative-zukunft.de/erneuerbare-energien-menu/photovoltaik> (accessed 25 February 2014).
14. Gremenok V.F. *Solnechnye elementy na osnovе poluprovodnikovyykh materialov* [Solar cells based on semiconductor materials]. Minsk, Zentr BGU Publ., 2007. 222 p.
15. Shapovalov V.A., Nikitenko Yu.A. *Profilirovannye monokristaly kremniya dlya solnechnoy energetiki* [Shaped silicon monocrystals for solar energy]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, 2014, no. 1 (89), pp. 48–52.
16. Mahon S. *SunPower claims new 23.4 percent solar cell efficiency record*. *PV-Tech*. 2014. Available at: [http://www.pvtech.org/news/sunpower\\_claims\\_new\\_234\\_percent\\_solar\\_cell\\_efficiency\\_record](http://www.pvtech.org/news/sunpower_claims_new_234_percent_solar_cell_efficiency_record) (accessed 14 February 2014).
17. Dubinin D.V., Geringer V., Pohl V., Heilig J. *Sistemny kompleks po issledovaniyu raboty solnechnykh batarey razlichnykh proizvoditeley v realnykh usloviyakh ekspluatatsii* [Solar Photovoltaic Research System for Investigating different PV Modules under real Conditions]. *Elektronnyy sredstva i sistemy upravleniya: Materialy dokladov IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [International Scientific-Practical Conference of «Electronic Instrumentation and Control Systems»]. Tomsk, V-Spektr Press, 2013. Vol. 2, pp. 140–145.
18. Roedem B. *Thin film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs*. Ed. by B. Roedem. *Refocus Press*, 2006, vol. 7, no. 4, pp. 34–39.
19. Jager-Waldau A. *R&D roadmap for PV*. *Thin Solid Films*, 2004, vol. 451, pp. 448–454.
20. Goetzberger A. *Photovoltaic materials, history, status and outlook*. *Material Science and Engineering*, 2003, vol. 40, pp. 1–46.

Received: 12 April 2014.