

УДК 621.311

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК: РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

*Т.С. Габдерахманова¹, С.В. Киселева², С.И. Зайцев²,
А.Б. Тарасенко¹, В.П. Шакун²*

¹Объединенный институт высоких температур РАН
РФ 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2
тел.: +7 (495) 485-93-90

²МГУ имени М.В. Ломоносова
РФ 119991, ГСП-1 Москва, Ленинские горы, д. 1, корп. 19
тел.: +7 (495) 939-42-57; e-mail: tts_91@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.006

Заключение совета рецензентов: 01.10.15 Заключение совета экспертов: 15.10.15 Принято к публикации: 23.10.15

В работе изложены некоторые результаты мониторинга автономной фотоэлектрической установки за двух-летний период эксплуатации. Приводятся основные принципы функционирования и состав системы мониторинга экспериментальной фотоэлектрической установки, а также перечень регистрируемых параметров.

Показаны результаты верификации (сравнения) данных о солнечной радиации из базы данных NASA SSE и значений суммарной солнечной радиации, приходящей на приемную поверхность фотоэлектрических модулей, полученных в ходе опытной эксплуатации ФЭУ на площадке научно-исследовательской лаборатории ВИЭ МГУ в течение 2013–2014 гг.

Описаны характеристики использованной в работе инженерной методики, предназначенной для оценки производительности фотоэлектрической установки; проведено сравнение расчетных результатов с экспериментальными, подтверждающее адекватность применения методики.

Рассмотрены некоторые аспекты опытной эксплуатации ФЭУ, имеющие существенное значение для функционирования систем мониторинга и эксплуатации ФЭУ.

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотоэлектрические системы, мониторинг фотоэлектрической установки, инженерная методика.

USE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: MONITORING AND PERFORMANCE EVALUATION RESULTS

*T.S. Gabderakhmanova¹, S.V. Kiseleva², S.I. Zaytsev²,
A.B. Tarasenko¹, V.P. Shakun²*

¹Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
2 Bd., 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412 Russian Federation
ph.: +7 (495) 485-93-90

²Lomonosov Moscow State University
1-19 Leninskiye Gory, Moscow, GSP-1, 119991 Russian Federation
ph.: +7 (495) 939-42-57, e-mail: tts_91@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.006

Referred 1 October 2015 Received in revised form 15 October 2015 Accepted 23 October 2015

The paper presents some monitoring results of the stand-alone PV system over a two-year period of operation. The structure and basic principles of the experimental PV plant monitoring system as well as a list of registered parameters are described.

The verification results of solar radiation data from the NASA SSE database and the values of total solar radiation incident on the PV module's surface are shown. These results were obtained in the PV experimental operation on the basis of the Renewable Energy Research Laboratory of the Lomonosov Moscow State University during 2013–2014.

The characteristics of the engineering methodology for assessing performance of the PV system, used in the work, were described. The comparison of the calculated and experimental results confirms the adequacy of the methodology.

The paper shows a number of aspects found during the PV system trial operation, which are essential for the PV system and monitoring system operation.

Keywords: solar energy, photovoltaic systems, photovoltaic installation monitoring, engineering method.



Габдерахманова
Татьяна Сергеевна
Tatiana S. Gabderakhmanova

Сведения об авторе: аспирант, младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Объединенного института высоких температур РАН.

Образование: Волгоградский государственный аграрный университет, электроэнергетический факультет (2013).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, энергоэффективные дома.

Публикации: 12.

Information about the author: postgraduate, junior researcher of the Renewable energy laboratory (Joint Institute for High Temperatures of the RAS).

Education: Volgograd State Agricultural University, Faculty of Electrical Engineering.

Research area: Renewable energy, solar energy, energy efficient houses.

Publications: 12.



Киселева Софья
Валентиновна
Sofia V. Kiseleva

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: физический факультет МГУ (1987) и аспирантура того же факультета (1990).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, оценка ресурсов ВИЭ, лабораторное моделирование динамических процессов в океане.

Публикации: более 70, в том числе патентов на изобретения.

Information about the author: PhD (physics and mathematics), senior researcher of the Renewable Energy Sources Laboratory (Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography).

Education: Physics faculty of Lomonosov Moscow State University.

Research area: renewable energy sources; resource evaluation, ecology-geographical aspects of renewable energy; laboratory modeling of ocean and atmosphere's dynamical process.

Publications: over 70, including patents.



Зайцев Сергей Иванович
Sergey I. Zaitsev

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, лабораторное моделирование процессов газообмена между океаном и атмосферой.

Публикации: более 70, в том числе патентов на изобретения.

Information about the author: PhD (physics and mathematics), senior researcher of the Renewable Energy Sources Laboratory (Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography).

Education: Physics faculty of Lomonosov Moscow State University.

Research area: renewable energy sources, laboratory modeling of gas exchange between the ocean and the atmosphere.

Publications: over 70, including patents.



Тарасенко Алексей Борисович
Aleksey B. Tarasenko

Сведения об авторе: младший научный сотрудник лаборатории алюмоводородной энергетики Объединенного института высоких температур РАН.

Образование: Московский инженерно-физический институт (МИФИ), факультет теоретической и экспериментальной физики.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии: солнечная энергетика, накопители энергии, опреснительные установки, водородная энергетика.

Публикации: более 25.

Information about the author: junior researcher of the Laboratory of Alumohydrogen Energy (Joint Institute for High Temperatures of the RAS).

Education: Moscow Engineering Physics Institute, Faculty of Theoretical and Experimental Physics.

Research area: renewable energy, solar energy, energy storage, desalination plants, hydrogen energy.

Publications: over 25.



Шакун Владимир Петрович
Vladimir P. Shakun

Сведения об авторе: инженер исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: Московский государственный педагогический университет, математический факультет.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; оценка ресурсов ВИЭ; геоинформатика, геоинформационные системы.

Публикации: 7.

Information about the author: engineer of the Renewable Energy Sources Laboratory (Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography).

Education: Moscow State Pedagogical University, Faculty of Mathematics.

Research area: renewable energy resource assessment, geoinformatics, geographic information systems.

Publications: 7.

Введение

В настоящее время на территории РФ реализован ряд пилотных проектов автономных и сетевых солнечных энергоустановок (СЭУ). Для технико-экономических оценок и усовершенствования методов проектирования подобных установок представляется необходимым проведение мониторинга их работы.

Важным направлением исследований, логически связанным с мониторингом, является разработка инженерных методик проектирования СЭУ, прогнозирования их производительности и степени покрытия нагрузки. При этом большие сложности возникают в связи с недостаточностью или отсутствием метеорологической и актинометрической информации в местах работы установок. Эта проблема требует анализа данных наземных наблюдений и математического моделирования с различной пространственной и временной детализацией.

Состав автономной солнечной энергоустановки НИЛ ВИЭ МГУ

На базе научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии МГУ имени М.В. Ломоносова (НИЛ ВИЭ) в 2012 году была создана опытно-демонстрационная автономная фотоэлектрическая установка (ФЭУ), предназначенная для решения следующих задач:

- поиска технических решений для систем автономного энергоснабжения с применением фотоэлектрических модулей (ФЭМ);

- экспериментальной проверки разработанной инженерной методики проектирования;

- получения актуальной информации об энергетических показателях работы ФЭМ, аккумуляторных батарей (АКБ) и установки в целом для оценки эффективности эксплуатации аналогичных систем в условиях г. Москвы.

В состав установки входят следующие элементы:

- ФЭМ MSW-180 «Солнечный ветер» (2 шт.);
- контроллер заряда Morningstar Sunsaver MPPT 15 A (24 В);
- аккумулятор гелевый свинцово-кислотный Prosolar-R RA12-260DG фирмы Ritar (2 шт.).

В качестве нагрузки используются светодиодные светильники суммарной мощностью 26 Вт или лампы накаливания суммарной мощностью 320 Вт (есть возможность регулирования нагрузки).

Система управления и сбора данных реализована на основе крейтовой системы LTR-1-4 фирмы LCard.

В состав системы мониторинга также входит пирометр QMS101 фирмы Kipp&Zonen, установленный в рабочей плоскости модуля. В конфигурации опорной конструкции ФЭМ предусмотрено ступенчатое изменение угла наклона в зависимости от сезона от 42° до 72°.

Визуализация, обработка и анализ входных сигналов осуществляется при помощи программного обеспечения PowerGraph v.3.0.

Перечень получаемых в ходе мониторинга характеристик представлен на рис. 1.



Рис. 1. Состав характеристик, определяемых системой мониторинга ФЭУ НИЛ ВИЭ МГУ
Fig. 1. The composition of the characteristics defined photovoltaic energy plant's monitoring system of the Renewable Energy Scientific Research Laboratory of the Moscow State University (RESRL of the MSU)

Система мониторинга работы ФЭУ НИЛ ВИЭ позволила провести апробацию разработанных подходов к проектированию автономных солнечных установок в части прогноза производительности.

Результаты верификации исходных актинометрических данных для прогнозирования производительности ФЭУ

Инженерная методика оценки потенциальной производительности ФЭУ была ранее изложена в работе [1]. В качестве входных данных о падающей солнечной радиации используются значения средних месячных сумм суммарной солнечной радиации на приемную поверхность с учетом угла наклона. В связи с недостаточностью наземных актинометрических данных, что характерно для большей части территории России, предлагается использовать базу данных NASA SSE – открытый интернет-ресурс, в котором приведены соответствующие данные для всей земной поверхности на сетке $(1 \times 1)^\circ$ [2]. Сравнение данных NASA SSE с результатами многолетних наземных актинометрических измерений проводилось ранее и показало удовлетворительные результаты [3].

Адекватность указанного источника данных также была проверена путем сопоставления среднемесячных значений суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность по данным NASA SSE с экспериментальными показаниями, полученными в ходе мониторинга ФЭУ НИЛ ВИЭ в течение 2013–2014 гг.

Относительная погрешность данных NASA SSE (1) составила 5–7 % летом и 25–27 % в апреле и октябре. В ноябре наблюдалось максимальное отклонение значений – от 43 до 59 %. Без учета ноябрьских аномалий средняя погрешность за период измерений равна 14,8 %, что позволяет использовать данные NASA для проектирования и первичных интегральных оценок производительности в теплые полгода.

$$\delta = \frac{I_{NASA} - I_{ФЭУ}}{I_{NASA}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где I_{NASA} – падающая солнечная радиация по данным NASA SSE, кВтч/м²/день; $I_{ФЭУ}$ – экспериментальные значения падающей солнечной радиации, кВтч/м²/день; δ – относительная погрешность, %.

На основе анализа приходящей солнечной радиации по данным NASA SSE были определены оптимальные углы наклона приемной поверхности ФЭМ для каждого месяца года. Так как величина прихода солнечной радиации значительно варьируется в зависимости от ориентации приемной поверхности модуля, на экспериментальной установке реализовано механическое сезонное изменение угла наклона ФЭМ к горизонту.

Для верификации полученных экспериментальных данных о величине солнечной радиации было проведено их сопоставление с данными наблюдений метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ) за 2013 (рис. 2) и 2014 года (рис. 3).

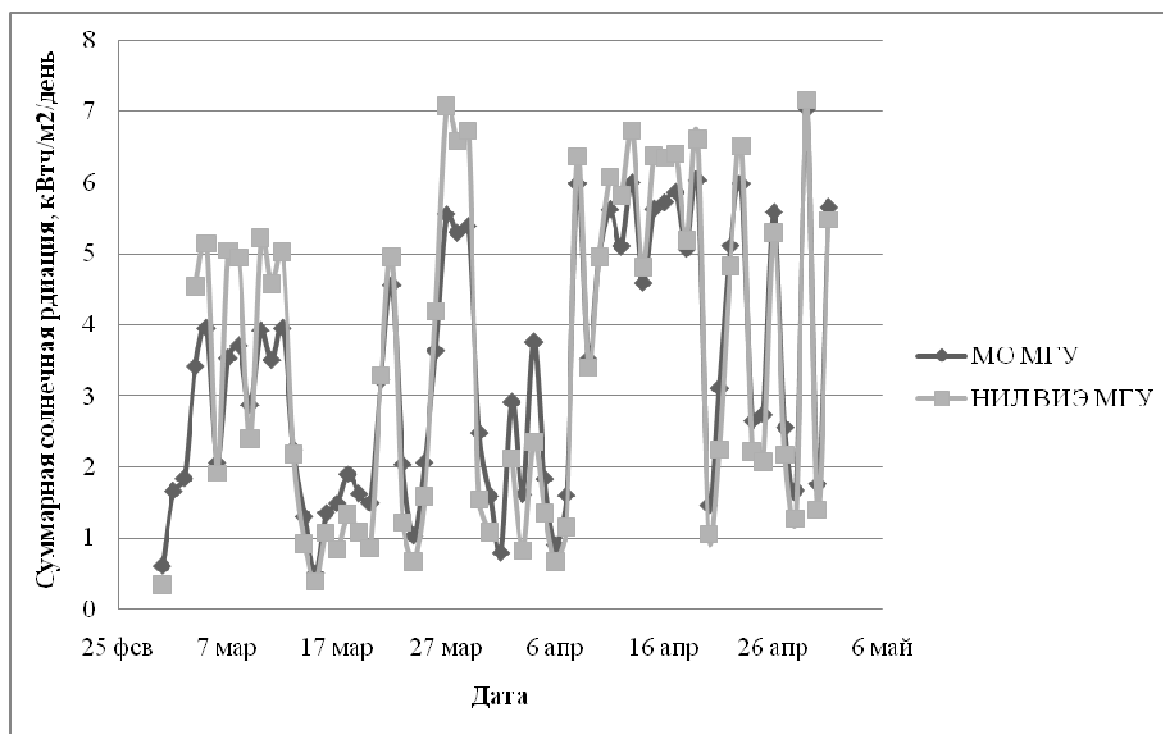


Рис. 2. Сравнение экспериментальных значений суммарной солнечной радиации по данным НИЛ ВИЭ МГУ и МО МГУ за весенний период 2013 г

Fig. 2. Comparison of experimental values for global solar radiation from RESRL of the MSU and the MSU Meteorological Observatory (MO MSU) for the spring, 2013

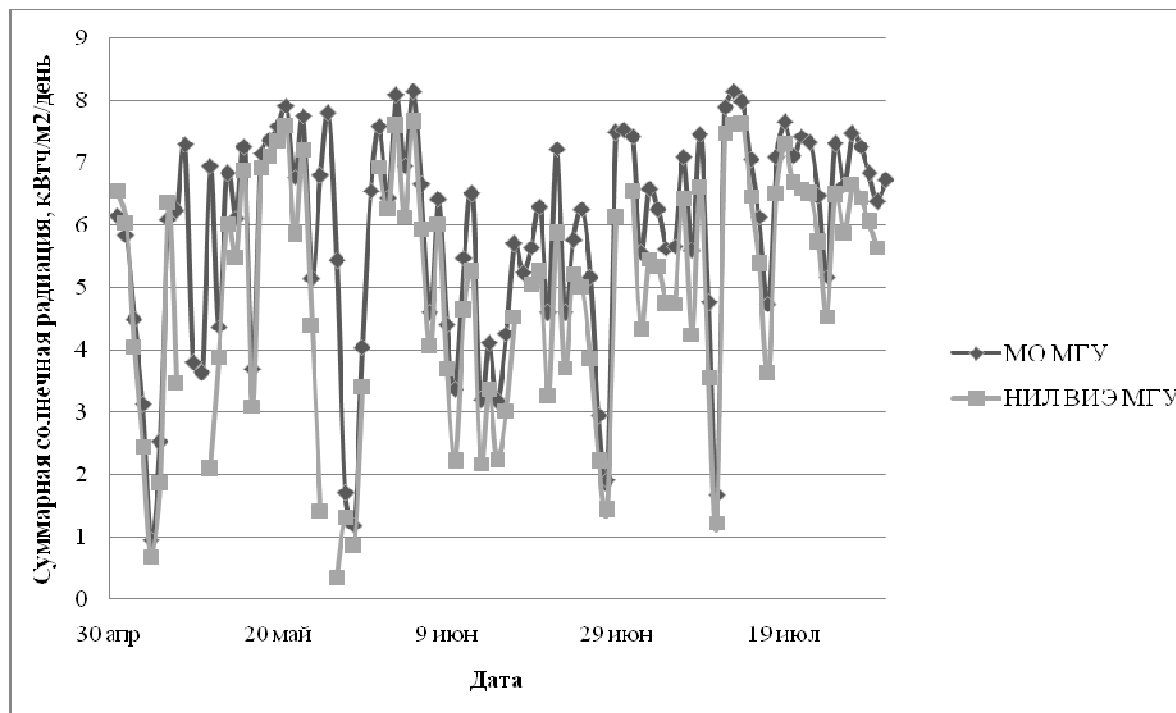


Рис. 3. Сравнение экспериментальных значений суммарной солнечной радиации по данным НИЛ ВИЭ МГУ и МО МГУ за период с мая по июль 2014 г.

Fig. 3. Comparison of experimental values of global solar radiation from RESRL of the MSU and the MO MSU for the period from May to July, 2014

Расхождение абсолютных значений объясняется различием в ориентации приемных поверхностей

(наклонная поверхность – горизонтальная поверхность), что особенно существенно для безоблачных

дней. В этом случае оптимальная с точки зрения прихода солнечной энергии ориентация ФЭМ экспериментальной установки обеспечивала большую величину дневной суммарной солнечной радиации.

Результаты мониторинга работы автономной ФЭУ НИЛ ВИЭ и анализа ее производительности

Инженерная методика, использованная в работе, определяла производительность ФЭУ на основе среднемесячных значений прихода суммарной солнечной радиации на единичную площадь поверхности, ориентированной под заданным углом к горизонту:

$$E = I \cdot \eta_{\text{мод}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{АКБ}} \cdot N_{\text{мод}} \cdot S, \quad (2)$$

где I – приход солнечной радиации на наклонную поверхность, кВтч/м²/день; $\eta_{\text{мод}}$ – КПД ФЭМ, %; $\eta_{\text{к}}$ – КПД контроллера заряда, %; $\eta_{\text{АКБ}}$ – КПД АКБ, %; $N_{\text{мод}}$ – количество ФЭМ в составе установки, шт.; S – площадь активной поверхности единичного ФЭМ, м².

Результаты расчета потенциальной производительности и располагаемой мощности ФЭМ на основе данных NASA SSE о падающей суммарной солнечной радиации при определенных углах наклона для условий московского региона представлены в [4].

Для подтверждения адекватности разработанной инженерной методики был проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных о производительности ФЭУ за период 2014 г с наиболее полными экспериментальными данными (май – август и ноябрь 2014 г) (табл.).

Видно, что отклонение результатов эксперимента от расчетных данных, полученных на основе базы

NASA SSE (δ), в летние месяцы составляет 10–15 %, а в ноябре 80 %. Проведенное сравнение исходных данных о падающей солнечной радиации – актуальных, т.е. полученных в ходе проведения мониторинга работы ФЭУ, и предоставляемых NASA SSE, – дает аналогичные по порядку величины отклонения.

В связи с этим был выполнен пересчет производительности ФЭУ по той же методике, но с учетом полученных в эксперименте актуальных данных о падающей солнечной радиации (последние столбцы таблицы). Видно, что, за исключением ноября, использование актуальных данных о солнечной радиации позволяет существенно снизить расхождение между расчетными и экспериментальными данными. Так, погрешность в ноябре удалось снизить почти на 20 %.

Таким образом, подтверждена адекватность предложенной инженерной методики в части оценки интегральной производительности автономных солнечных установок. Было выявлено, что основной вклад в погрешность вносят исходные данные о падающей солнечной радиации. В связи с этим использование базы данных NASA SSE, предоставляющей достоверные данные о средних многолетних значениях падающей солнечной радиации, при прогнозе производительности на некоторый текущий период должно быть дополнено обоснованием погрешности прогноза.

Для минимизации погрешности расчетов в следующей версии методики необходимо предусмотреть также учет двух дополнительных факторов: ухудшение характеристик монокристаллических модулей в зимний период за счет преобладания в составе солнечной радиации на большей части территории России рассеянной составляющей и снижение КПД контроллера и вырабатываемой мощности фотоэлектрического модуля при малых значениях инсоляции.

Таблица
Сравнение расчетной и экспериментальной среднесуточной производительности автономной солнечной энергоустановки
Table
Comparison of the calculated and experimental average daily performance of the autonomous solar power plant

Месяц	$E_{\text{расч}}$	$E_{\text{эксп}}$	$\delta = \left \frac{E_{\text{расч}} - E_{\text{эксп}}}{E_{\text{расч}}} \right \cdot 100\%$	$E_{\text{расч}}^*$	$\delta^* = \left \frac{E_{\text{расч}}^* - E_{\text{эксп}}}{E_{\text{расч}}^*} \right \cdot 100\%$
май	1,744	1,5	14,0	1,472	1,9
июнь	1,693	1,47	13,2	1,567	6,2
июль	1,704	1,87	9,8	1,942	3,7
август	1,557	1,32	15,2	1,465	9,9
ноябрь	0,528	0,11	79,6	0,256	57,0

$E_{\text{эксп}}$ – экспериментальная производительность, кВтч; $E_{\text{расч}}^*$ – расчетная производительность с учетом актуальных солнечных данных, кВтч; δ – отклонение экспериментальных результатов от расчетных (по данным NASA), %; δ^* – отклонение экспериментальных результатов от расчетных с учетом актуальных солнечных данных, %.

В ходе опытной эксплуатации ФЭУ был обнаружен ряд аспектов, имеющих существенное значение для функционирования системы мониторинга и установки в целом. Так, для корректного определения суточных значений энергетического баланса установки в целом

и производительности ФЭМ в режиме мониторинга необходимо подбирать нагрузку ФЭУ таким образом, чтобы вся накопленная в аккумуляторах в течение светлого времени суток энергия расходовалась за сутки (система «обнулялась» каждые сутки). Исходя из

этих соображений в ФЭУ НИЛ ВИЭ реализовано ступенчатое изменение нагрузки от 90 Вт зимой до 194 Вт в летний период.

Второй важный аспект касается разряда аккумуляторов на малых токах. В данном режиме АКБ разряжаются ниже разрешенной глубины разряда, при этом несимметричный разряд аккумуляторов, включенных последовательно в цепь, не фиксируется контроллером заряда. В результате возникает и усиливается разбаланс аккумуляторов, что приводит к полному выходу из строя отдельных аккумуляторов. Следовательно, необходима синхронизация аккумуляторов в начале эксплуатации, а также использование эффективной системы балансировки заряда аккумуляторных батарей.

Заключение

Для исследования особенностей работы автономных солнечных установок создана локальная ФЭС, оснащенная системой мониторинга. В качестве регистрируемых параметров были выбраны и обоснованы следующие характеристики: токи и напряжения на каждом аккумуляторе, фотоэлектрическом модуле и на нагрузке, а также мгновенные значения падающей солнечной радиации, приходящей на наклонную поверхность.

В ходе опытной эксплуатации разработанной системы в течение двухлетнего периода (2013–2014 гг.) были получены данные, использованные впоследствии для расчета производительности ФЭС. Результаты оценки сопоставлялись с предварительным прогнозом, сделанным на основе разработанной ранее авторской инженерной методики. При этом в качестве исходных актинометрических параметров для прогноза использовались предоставляемые базой данных NASA SSE среднесезонные значения падающей солнечной радиации. Погрешность прогноза производительности ФЭС за 2014 год, выполненного по инженерной методике на основе среднесезонных данных, в летние месяцы составляет 10–15 %, а в ноябре достигает значительной величины – около 80 %. Пересчет производительности ФЭС по указанной методике с использованием в качестве входных значений текущих показаний пиранометра в составе ФЭС показал, что основной вклад в погрешность вносит расхождение средних многолетних данных и фактического прихода солнечной радиации. Таким образом, доказана возможность применения разработанной методики для прогноза производительности автономных ФЭС.

Опыт эксплуатации установки позволил обнаружить несколько аспектов, которые следует учитывать при эксплуатации подобных систем. Так, при работе ФЭС в режиме мониторинга необходимо

обеспечить такую нагрузку, при которой вся накопленная в аккумуляторах за день энергия расходовалась бы до начала следующих суток. Также важно оснастить аккумуляторные батареи, работающие в составе автономной фотоэлектрической установки, системой контроля и балансировки заряда, поскольку это оказывает непосредственное влияние на продолжительность их срока службы и работоспособность системы в целом.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ, проект № 13-08-01186.

Список литературы

1. Тарасенко А.Б., Тетерина Н.В., Киселева С.В. О возможности оптимизации энергетического баланса островного поселения (на примере пос. Соловецкий Архангельской области) // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). 2012. № 5–6. С. 187–196.
2. NASA Surface meteorology and Solar Energy. Atmospheric science data center. [Электронный ресурс]: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 10.04.2015).
3. Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: ОИВТ РАН, 2010. 85 с.
4. Габдерахманова Т.С., Киселева С.В., Зайцев С.И., Тарасенко А.Б., Шакунов В.П. Проблемы мониторинга солнечных энергетических систем в России // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 4 (в печати).

References

1. Tarasenko A.B., Teterina N.V., Kiseleva S.V. O vozmozhnosti optimizacii energetičeskogo balansa ostrovnogo poseleniâ (na primere pos. Soloveckij Arhangel'skoj oblasti). *International Scientific Journal «Alternativnââ energetika i êkologiâ» (ISJAE)*, 2012, no. 5–6, pp. 187–196 (in Russ.).
2. NASA Surface meteorology and Solar Energy. Atmospheric science data center. Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (10.09.2015) (in Eng.).
3. Frid S.E., Kolomic Yu.G., Kiseleva S.V., Terehova E.N. Atlas resursov solnečnoj energii na territorii Rossii. Moscow: OIVT RAN Publ., 2010, 85 p (in Russ.).
4. Gabderahmanova T.S., Kiseleva S.V., Zaytsev S.I., Tarasenko A.B., Shakun V.P. Problemy monitoringa solnečnyh energetičeskikh sistem v Rossii. *Vestnik Ūžno–Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seria «Ênergetika»*, 2015, vol. 15, no. 4 (in print) (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

