

УДК 621.311.25

# ПЕРВИЧНАЯ АПРОБАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДВУХКООРДИНАТНОГО СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ПЕРСПЕКТИВА СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА\*

**С.В. Митрофанов<sup>1</sup>, А.Ю. Немальцев<sup>2</sup>, Д.К. Байкасенов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (ОГУ),  
д. 141, пр-т Победы, Оренбург, 460005, Россия  
тел.: +7(3532)37-25-09; e-mail: mitser2002@mail.ru, baykasenov@bk.ru

<sup>2</sup>АО «Завод «Инвертор»»  
д. 8, пр-д Автоматики, Оренбург, 460048, Россия  
тел.: +7(3532)48-24-52; e-mail: nemalcev@sbp-invertor.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.043-054

Заключение совета рецензентов: 28.02.18    Заключение совета экспертов: 05.03.18    Принято к публикации: 12.03.18

Одной из причин высокой себестоимости электрической энергии, вырабатываемой стационарными солнечными электростанциями, является низкий коэффициент полезного действия фотоэлектрических преобразователей. Использование высокоточных систем непрерывного слежения за солнцем позволит решить данную проблему.

Приведено подробное описание разработанной модернизированной структуры автономной фотоэлектрической установки со статично и динамично расположенными модулями солнечных батарей и физической модели автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера. Представленная разработка повышает энергоэффективность использования солнечных батарей за счет точного наведения динамично расположенных солнечных модулей на солнце по двум координатам (азимуту и углу склонения) в течение дня. Кроме того, указана другая особенность данной гелиоустановки, заключающаяся в том, что статично и динамично расположенные фотоэлектрические модули комплектуются двумя типами солнечных батарей – монокристаллическими и поликристаллическими, что приводит к дополнительному выигрышу в выработке электрической мощности независимо от облачности. Отмечены реализованные способы повышения надежности работы автономной солнечной электростанции. Также рассмотрены существующие системы слежения за солнцем как в Российской Федерации (Оренбургская, Томская, Челябинская области), так и за рубежом (Соединенные Штаты Америки, Индия, Иран, Турция, Тайвань) и обоснована необходимость внедрения фотоэлектрических установок с солнечными трекерами. Авторами статьи успешно проведены первичные испытания разработанной автономной солнечной электростанции, суть которых заключалась в экспериментальном сравнении выработки электроэнергии с помощью статично и динамично расположенных модулей солнечных батарей. Результаты проведенных опытов показали, что применение солнечного модуля с высокоточной системой слежения по двум осям, по сравнению со статично расположенным модулем, позволяет увеличить коэффициент полезного действия фотоэлектрической установки на 50 %. Таким образом, экспериментально доказана эффективность применения автоматизированных следящих систем. Работа может быть полезна при проектировании энергоэффективных фотоэлектрических установок с системами непрерывного слежения за солнцем.

Ключевые слова: двухкоординатный солнечный трекер; системы слежения за солнцем; повышение энергетической эффективности автономных солнечных станций; солнечные станции Оренбургской области; альтернативная энергетика в Оренбуржье.

\*Митрофанов С.В., Немальцев А.Ю., Байкасенов Д.К. Первичная апробация автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера в климатических условиях Оренбургской области как перспектива создания программно-аппаратного комплекса // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):43-54.



## PRIMARY TESTING OF AUTOMATED DUAL-AXIS SOLAR TRACKER IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE ORENBURG REGION AS THE PROSPECTS FOR THE ESTABLISHMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX

*S.V. Mitrofanov<sup>1</sup>, A.U. Nemaltsev<sup>2</sup>, D.K. Baykasenov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Orenburg State University  
141 Pobeda Ave., Orenburg, 460005, Russia  
tel: +7 3532 37 25 09; e-mail: mitser2002@mail.ru, baykasenov@bk.ru

<sup>2</sup>JSC "Invertor Factory"  
8 Avtomatika Dr., Orenburg, 460048, Russia  
tel.: +7 3532 48 24 52, e-mail: nemalcev@sbp-invertor.ru

doi: 10.15518/isjeee.2018.07-09.043-054

Referred 28 February 2018 Received in revised form 5 March 2018 Accepted 12 March 2018

One of the reasons for the high cost of electricity generated by statically located solar power plants is the low efficiency of photoelectric converters. Using high-precision solar tracking system will solve this problem.

The paper provides a detailed description of the developed modernized structure of an autonomous solar power station with statically and dynamically located modules of solar batteries and a physical model of an automated dual-axis solar tracker. The presented development allows us to increase energy efficiency of solar batteries by precision pointing dynamically located solar modules on the Sun in two coordinates (azimuth and declination angle) during the day. In addition, it is shown that another feature of this photovoltaic system is that statically and dynamically located photoelectric modules are equipped with two types of solar cells – monocrystalline and polycrystalline that leads to an additional gain in the generation of electrical power regardless of the clouds. The ways of increasing the reliability of the autonomous solar power plant operation are mentioned. We have considered the solar tracking systems in the Russian Federation (Orenburg, Tomsk, Chelyabinsk regions) and abroad (United States of America, India, Iran, Turkey, Taiwan), and have justified the necessity of using photovoltaic systems with solar trackers. Moreover, we have successfully tested the developed autonomous solar power plant; the essence of the tests is in an experimental comparison of power generation using statically and dynamically located solar cell modules. The results of the experiments have showed that the use of a solar module with a precision dual-axis solar tracking system, in comparison with a statically located module, makes it possible to increase the efficiency of a photovoltaic installation by 50 %. Thus, experimental evidence of the effectiveness of the automated tracking system application has been obtained. The work can be useful in the design of energy-efficient photovoltaic installations with the solar tracking system.

Keywords: dual-axis solar tracker; solar tracking systems; improving the energy efficiency of autonomous solar power plants; solar power plants in the Orenburg Region; alternative energy in the Orenburg Region.



*Сергей Владимирович  
Митрофанов  
Sergey Mitrofanov*

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, доцент, декан электроэнергетического факультета ФБГОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

**Образование:** Оренбургский государственный университет (1996 г.).

**Область научных интересов:** энергосбережение; электромагнитная совместимость; качество электрической энергии; возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** 68.  
*h*-index 3

**Information about the author:** Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Dean of Faculty of Electrical Power Engineering, Orenburg State University.

**Education:** Orenburg State University, 1996.

**Research interests:** energy saving; electromagnetic compatibility; electric power quality; renewable energy sources.

**Publications:** 68.



Александр Юрьевич  
Немальцев  
Alexander Nemaltsev

**Сведения об авторе:** ведущий инженер по работе с проектными институтами АО «Завод «Инвертор»».

**Образование:** Оренбургский государственный университет: бакалавр (2015 г.), магистр (2017 г.).

**Область научных интересов:** автоматизированные энергетические системы и комплексы; устройства для измерения и тестирования фотоэлектрических установок.

**Публикации:** 11.  
h-index 1

**Information about the author:** Leading Engineer for work with project institutes, JSC "Inverter Factory".

**Education:** Orenburg State University: bachelor, 2015; master, 2017.

**Research interests:** automated energy systems and complexes; devices for measuring and testing photovoltaic systems.

**Publications:** 11.



Дамир Куандыкович  
Байкашенов  
Damir Baykashenov

**Сведения об авторе:** студент магистратуры Оренбургского гос. университета (электроэнергетический факультет).

**Образование:** Оренбургский государственный университет (2017 г.).

**Область научных интересов:** солнечная энергетика; возобновляемые источники энергии; энергосбережение.

**Публикации:** 14.  
h-index 1

**Information about the author:** Student of Master's program at Orenburg State University (Faculty of Electrical Power Engineering).

**Education:** Orenburg State University, 2017.

**Research interests:** solar power engineering; renewable energy sources; energy saving.

**Publications:** 14.



## 1. Введение

Созданная человечеством техносфера способствует постепенному истощению природных ресурсов, загрязнению окружающей среды, а также ухудшению здоровья людей. С целью сохранения экологии и обеспечения энергетической независимости, большинство развитых стран (Германия, США, Дания, а в последние годы – Россия) стали наращивать мощности ВИЭ. На данный момент наибольшее внимание уделяется развитию гелиоэнергетики, поскольку энергия солнца – неисчерпаема, распространена повсеместно и является экологически чистой по сравнению с традиционными источниками.

Солнечные электростанции (СЭС) обладают как достоинствами (повсеместное распространение, неисчерпаемость и экологичность энергоисточника), так и недостатками. Главным недостатком – низкий КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) (около 28 %), что является причиной высокой себестоимости генерируемой электроэнергии. Солнечные панели в стационарном положении получают основную долю энергии солнца в полдень, хотя значительная мощность доступна и в утренние часы, и после полудня. Эти потери связаны с принципом работы ФЭП, поскольку наибольшая производительность статично расположенных солнечных модулей обеспечивается при попадании солнечных лучей на поверхность СБ под прямым углом, а именно в полдень. Увеличение различия между углами падающего светового потока на поверхность СБ и нормалью солнечной панели приводит к снижению мощности, вырабатываемой СЭС.

Одним из способов повышения энергоэффективности использования СЭС является применение автоматизированных систем непрерывного слежения за солнцем (солнечных трекеров).

Большой вклад в развитие систем непрерывного слежения за солнцем внесли отечественные исследователи. Например, К.В. Аржановым разработана автономная ФЭУ с двухкоординатной системой наведения солнечных батарей на солнце мощностью 1 500 Вт, а также проведены исследования энергетических характеристик станции и разработаны способ и алгоритм управления ФЭУ, цифровые модели элементов систем слежения за солнцем с электромеханическими исполнительными механизмами [1–3]. А.С. Петрусевым разработана ФЭУ мощностью 190 Вт с солнечным трекером для электроснабжения удаленных районов и предложено внедрение гелиостанций с одновременным использованием солнечных трекеров и акриловых концентраторов [4, 5]. Исследователями А.В. Юрченко, М.В. Китаевой, А.В. Охорзиной, А.В. Скороходовым разработан экспериментальный макет одноосной системы слежения за солнцем (мощность установки 5 Вт), проведены испытания данной ФЭУ, которые подтвердили эффективность использования солнечных трекеров [6, 7]. Группа ученых во главе с Ю.А. Шиняковым в работе [8] представила описание автономной энергоустановки с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей, позволяющей повысить энергоэффективность ФЭУ более чем на 98 % при шаговом изменении напряжения СБ. В работе Ф.В. Саврасова представлены результаты исследований способов повы-

шения энергоэффективности автономных ФЭУ, в частности солнечных трекеров [9]. И.Р. Рахматуллин применил систему слежения за солнцем для того, чтобы повысить производительность разработанного солнечного опреснителя [10–12]. В 2017 г. в России введен ГОСТ Р 57229-2016 [13], который предъявляет жесткие требования к системам слежения за солнцем. Создание нормативно-технической базы позволит разработчикам солнечных трекеров конструировать высококачественные энергоэффективные ФЭУ, отвечающие современным требованиям.

Применение солнечных трекеров актуально не только в России, но и за рубежом, поскольку системы непрерывного слежения, как правило, считаются неотъемлемой частью большинства автономных энергоэффективных гелиостанций. В работе [14] описаны все существующие типы однокоординатных (с вертикальной, горизонтальной и наклонной осями вращения) и двухкоординатных (солнечные модули располагаются либо на опорной плоскости, либо на несущем столбе) следящих систем, рассмотрены их особенности, указаны достоинства и недостатки. Зарубежный опыт проектирования солнечных трекеров с одной и двумя степенями свободы представлен в работах [15, 16] и [17–19] соответственно. В статье [20] рассмотрена математическая модель двухосевой системы слежения за солнцем и тем самым доказана эффективность этой системы. Вопрос разработки

систем управления солнечными трекерами на базе Arduino детально освещен в статьях [21, 22]. Результаты исследования, приведенные в статье [23], свидетельствуют о том, что использование СЭС с однокоординатным солнечным трекером позволило увеличить генерацию электрической мощности на 33 % относительно ФЭУ с фиксированным солнечным модулем.

Целью данного исследования является проведение первичных испытаний фотоэлектрической установки с двухкоординатной системой слежения за солнцем в климатических условиях Оренбургской области. В задачи исследования входят: проектирование модернизированной структуры автономной СЭС, практическая оценка эффективности автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера (АДСТ), обработка полученных экспериментальных данных. Эти вопросы в литературных источниках освещены недостаточно, поэтому поставленные задачи являются актуальными.

Впервые в ФЭУ с АДСТ реализовано совместное использование монокристаллических и поликристаллических солнечных батарей (СБ), что привело к повышению энергоэффективности СЭС независимо от облачности. Кроме того, разработано собственное программное обеспечение для управления системой слежения, а также для защиты установки от налипания снега, гололедообразования и ветровых нагрузок.



| <b>Список обозначений</b>        |  |
|----------------------------------|--|
| <i>Буквы латинского алфавита</i> |  |
| <i>I</i>                         | Сила тока, А   |
| <i>M</i>                         | Двигатель  |
| <i>P</i>                         | Активная мощность, Вт                                |
| $\Delta P$                       | Потери активной мощности, %                          |
| <i>t</i>                         | Время, ч   |
| <i>W</i>                         | Выработанная электроэнергия, Вт·ч                    |
| <i>Буквы русского алфавита</i>   |  |
| Р                                | Редуктор червячный                                   |
| <i>Индексы нижние</i>            |  |
| <i>cts</i>                       | Контроллер наведения на солнце                       |
| <i>dyn</i>                       | Динамично расположенный модуль солнечных батарей     |
| <i>max</i>                       | Максимальное значение                                |
| <i>stat</i>                      | Статично расположенный модуль солнечных батарей      |
| <i>w</i>                         | Рабочее значение                                     |
| <i>wPV</i>                       | Рабочее значение для солнечной батареи               |
| <i>Аббревиатуры</i>              |  |
| АДСТ                             | Автоматизированный двухкоординатный солнечный трекер |
| АКБ                              | Аккумуляторная батарея                               |
| АСЭС                             | Автономная солнечная электростанция                  |
| ВИЭ                              | Возобновляемые источники энергии                     |
| ДВ                               | Датчик ветра   |
| ДПТ                              | Двигатель постоянного тока                           |
| ДС                               | Датчик положения солнца                              |
| ДМ                               | Дискретный модуль                                    |
| ИН                               | Инвертор напряжения                                  |
| КВ                               | Концевые выключатели                                 |
| КЗР                              | Контроллер заряда – разряда аккумуляторной батареи   |
| КНС                              | Контроллер наведения на солнце                       |
| КПД                              | Коэффициент полезного действия                       |
| ПЛК                              | Программируемый логический контроллер                |

|     |                                   |
|-----|-----------------------------------|
| СЭС | Солнечная электростанция          |
| СБ  | Солнечные батареи                 |
| ФЭП | Фотоэлектрические преобразователи |
| ФЭУ | Фотоэлектрическая установка       |

## 2. Теоретический анализ

### 2.1. Принципиальная схема автономной солнечной электростанции

На крыше одного из корпусов Оренбургского государственного университета установлена и введена в эксплуатацию АСЭС с АДСТ суммарной мощностью 800 Вт. Вырабатываемая мощность СЭС идет на частичное покрытие затрат на освещение аудиторий корпуса (далее – потребитель электроэнергии). В

работе [24] приведен подробный расчет мощности ФЭУ и ее основных элементов (СБ, ИН, КЗР, АКБ), а также представлены результаты расчета осветительной нагрузки.

АСЭС состоит из трех основных частей: АДСТ с закрепленными на нем СБ; статично смонтированных СБ на жестко закрепленной площадке; системы управления АСЭС (лабораторного стенда). Принципиальная электрическая схема работы станции представлена на рис. 1.

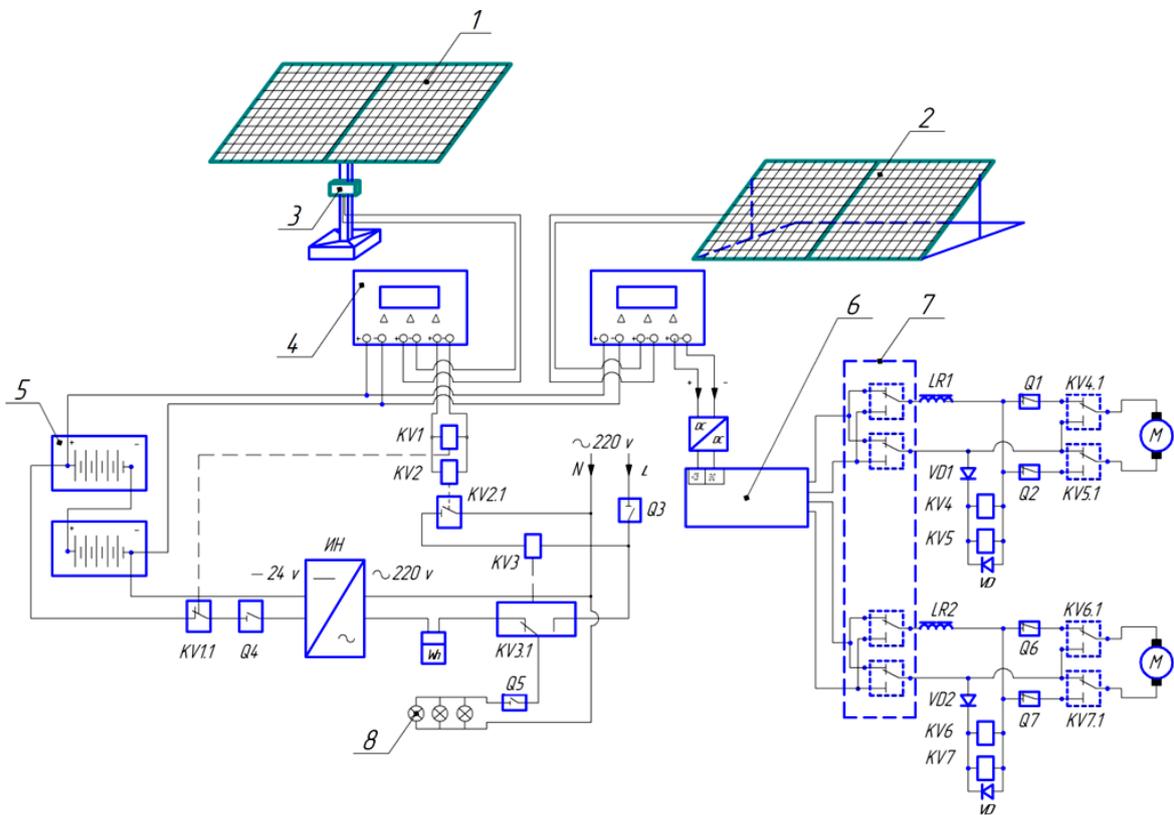


Рис. 1 – Принципиальная электрическая схема автономной солнечной электростанции:

- 1 – динамично расположенный модуль солнечных батарей; 2 – статично расположенный модуль солнечных батарей;  
 3 – монтажный короб; 4 – контроллер заряда аккумуляторной батареи; 5 – аккумуляторные батареи;  
 6 – микроконтроллер «Arduino Mega»; 7 – модульное реле; 8 – осветительная нагрузка

Fig. 1 – Principal scheme of an autonomous solar power station:

- 1 – dynamically located solar cell modules; 2 – statically located solar cell modules; 3 – junction box; 4 – charge controller;  
 5 – batteries; 6 – microcontroller “Arduino Mega”; 7 – relay module; 8 – lighting load

Выбор данной электрической схемы АСЭС обоснован необходимостью проведения экспериментального сравнения выработки электроэнергии с помощью статично и динамично расположенных модулей СБ. Модернизация структуры станции проявляется в применении двух типов СБ: монокристаллических Exmork ФСМ-200М (генерируют большую электрическую мощность в единицу времени при ясной по-

годе по сравнению со вторым типом) и поликристаллических Exmork ФСМ-200П (вырабатывают больше мощности в единицу времени относительно предыдущих при пасмурной погоде). Совместная работа двух статично расположенных типов СБ обеспечит взаимную компенсацию недостаточной выработки мощности и оптимизацию экономических затрат. Другая пара модулей СБ, закрепленная на подвиж-

ной платформе АДСТ, будет облучена все время и теоретически должна генерировать максимальную электрическую мощность.

Представленные на схеме контроллеры «заряда – разряда» № 1 и № 2 в онлайн режиме регистрируют выходные параметры СБ (напряжение; сила тока; температура панели СБ; накопленная за день электроэнергия в А·ч). Энергия накапливается в АКБ емкостью 100 А·ч при постоянном напряжении 24 В. ИН трансформирует энергию в переменное синусоидальное напряжение 220 В, 50 Гц. Однофазный счетчик учитывает количество энергии, которую потребляет нагрузка.

Потребители получают питание от АКБ, если его заряд выше 30 %. В случае когда при пасмурной погоде заряд АКБ меньше установленного значения, группой реле KV1 – KV3 осуществляется перевод потребителей на основное питание системы электропитания корпуса. Этот принцип является отличительной особенностью разработанной АСЭС.

## 2.2. Проектирование автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера

Одним из основных способов повышения энергетической эффективности АСЭС является реализация автоматического слежения рабочей поверхности СБ за солнцем. Кроме того, степень повышения энергоэффективности гелиостанций зависит от широты местности и условий эксплуатации ФЭУ.

Для разработанной АСЭС был выбран двухкоординатный солнечный трекер, поскольку данный трекер, в отличие от однокоординатного, вращается не только в направлении восток-запад, но и постепенно изменяет наклон платформы АСЭС, следуя за изменением склонения солнца.

Основными составными элементами конструкции АДСТ являются: рабочая подвижная платформа; линейный актуатор; червячный редуктор; два коллекторных ДПТ; опорная мачта; крестообразная платформа; четыре концевых выключателя.

Рабочая платформа площадью 2 м<sup>2</sup>, состоящая из двух СБ мощностью по 200 Вт каждая, позиционируется по азимуту благодаря вращающему моменту, который передается от коллекторного ДПТ через червячный редуктор [25]. Вертикальное позиционирование рабочей платформы обеспечивает линейный актуатор. Подвижная рабочая платформа вместе с электроприводом управления АДСТ жестко смонтирована на опорной мачте, основание которой представляет собой крестообразную устойчивую платформу. Общий вид спроектированного АДСТ представлен на рис. 2.



Рис. 2 – Общий вид автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера  
Fig. 2 – General view of the automated dual-axis solar tracker

Следящая система автоматического управления включает в себя: ДС; КНС; два ДПТ с редукторами; четыре КВ (рис. 3).

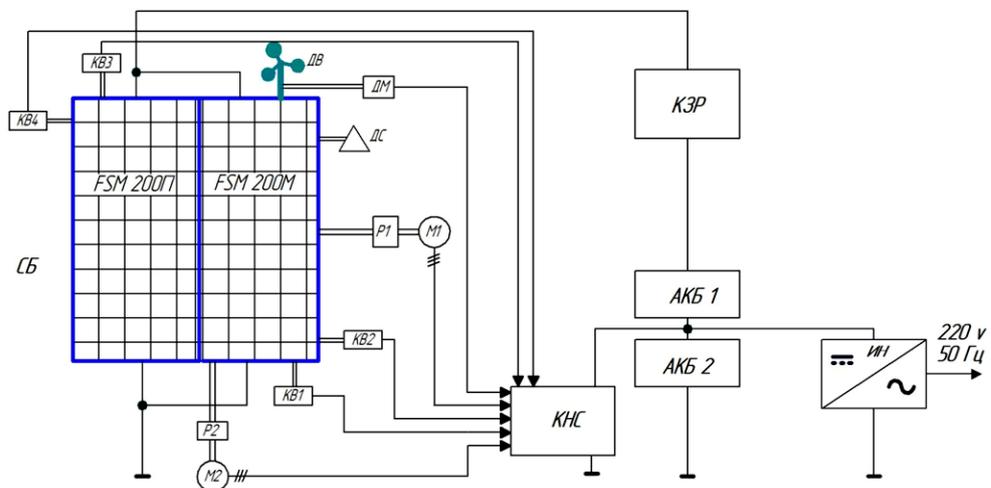


Рис – 3.  
Функциональная схема АДСТ  
Fig. 3 – Functional scheme of an automated dual-axis solar tracker



### 3. Методика эксперимента

Управление системой непрерывного слежения за солнцем осуществлялось посредством ПЛК Arduino Uno [26, 27]. При заходе солнца платформа АДСТ направлена на запад, но со временем происходит снижение солнечной активности, светового потока уже недостаточно для генерации энергии СБ, поэтому КЗР АКБ подает команду на позиционирование платформы на восток [28]. При этом КВ предотвращают чрезмерный поворот рабочей платформы АДСТ. В режиме автоматического слежения за солнцем КНС (микроконтроллер Arduino и электропривод АДСТ) осуществляет точное наведение рабочей поверхности АДСТ на солнце путем измерения дискретных сигналов в виде уравнивающих токов от ДС. Если правый и левый фотоэлементы выдают одинаковое значение силы тока (одновременно освещаются солнцем), то система слежения не перемещает платформу по координате  $X$  (по азимуту); если разное, то солнечный трекер перемещает платформу до полной компенсации разности по силе тока. Принцип позиционирования по координате  $Y$  (по углу места) аналогичен.

Ветровые нагрузки, налипание снега и гололедные образования могут нарушить бесперебойную работу СЭС. Для защиты от разрушающего

воздействия ветра (при скорости более  $8 \div 9$  м/с) чашечный анемометр анализирует ветровую нагрузку, а ДВ формирует аналоговый сигнал на ДМ. После этого сигнал интегрируется по времени и скорости, затем цифровой сигнал поступает на ПЛК Arduino, обрабатывается, и далее подается команда на электропривод, чтобы он переориентировал трекер в горизонтальное положение [29]. С целью защиты станции от гололедообразования и снежных отложений применен резистивный датчик давления [30].

Для экспериментального исследования работы АДСТ был выбран период с 15.05.2017 по 21.05.2017. В рассматриваемый период в течение трёх дней было ясно, в остальные дни – пасмурно. Эксперимент проводился в один из солнечных дней. Первая пара модулей СБ была жестко смонтирована на специально ориентированной платформе, вторая – закреплена на рабочей платформе АДСТ. Суммарная мощность каждой пары составляла 400 Вт.

### 4. Результаты и их обсуждение

Экспериментальные данные по выработке электрической мощности модулями СБ в условиях статики и динамики сведены в табл. 1.

Экспериментальные данные статично и динамично расположенных модулей солнечных батарей  
Table 1  
Experimental data of statically and dynamically located solar modules

| Время, ч | Облачность | $I_w, A$ |        | $U_w, B$ |        | $P_{wPV}, Bt$ |        | $P_{cts}, Bt$ | $\Delta P, \%$ |        |
|----------|------------|----------|--------|----------|--------|---------------|--------|---------------|----------------|--------|
|          |            | Стат.    | Динам. | Стат.    | Динам. | Стат.         | Динам. | Динам.        | Стат.          | Динам. |
| 05:00    | ясно       | 0,32     | 0,32   | 23,1     | 23,1   | 7,4           | 7,4    | 0             | 98,12          | 98,12  |
| 07:00    | ясно       | 1,7      | 14,2   | 23,1     | 23,1   | 39,27         | 328,02 | 3,822         | 90,2           | 17,99  |
| 09:00    | ясно       | 5,9      | 14,75  | 26,4     | 26,3   | 155,76        | 387,92 | 3,742         | 61,1           | 3,01   |
| 11:00    | ясно       | 10,2     | 14,8   | 26,2     | 26,5   | 267,24        | 392,2  | 3,614         | 33,2           | 1,95   |
| 13:00    | ясно       | 14,1     | 14,9   | 26,3     | 26,6   | 370,83        | 396,34 | 0,124         | 7,3            | 0,91   |
| 15:00    | ясно       | 9,7      | 14,7   | 25,8     | 26,6   | 250,26        | 391,02 | 0,222         | 37,4           | 2,24   |
| 17:00    | ясно       | 5,5      | 14,7   | 24,7     | 26,2   | 135,85        | 385,14 | 3,526         | 66             | 3,71   |
| 19:00    | ясно       | 2,5      | 14,4   | 23,8     | 25,8   | 59,5          | 371,52 | 3,827         | 85,1           | 7,12   |
| Итого    |            |          |        |          |        |               |        | 18,88         | 478,42         | 135,05 |

На основании экспериментальных данных были построены графические зависимости выработки электрической мощности модулями СБ от времени (рис. 4). Поскольку длительность эксперимента была ограничена во времени, чтобы узнать значения для остальных моментов времени применялась экстраполяция. Для экстраполяции и аппроксимации полученных

данных использовалась функция «линия тренда» в программе Microsoft Excel.

Судя по графику зависимости  $P_{stat} = f(t)$  (см. рис. 4), мощность, вырабатываемая модулем СБ, не стабильна на протяжении всего времени работы. Это объясняется тем, что за весь цикл солнечной активности рабочая площадь СБ освещалась неравномерно. По мере увеличения угла с востока на запад и по



склонению по высоте солнца в геометрической прогрессии начинает возрастать значение силы тока. В 13:00 положение солнца практически соответствует идеальным значениям координат, когда основной поток солнечного излучения направлен к плоскости рабочей панели под углом примерно 90°. Это подтверждается экспериментальными значениями максимальной выходной мощности модуля СБ, которая составляет 370,83 Вт, при этом суммарные потери мощности равны 478,42 Вт. Потери мощности обусловлены, как правило, неточным облучением рабочей поверхности модуля СБ, неравномерным распределени-

ем солнечной инсоляции в течение суток и потерями электроэнергии в кабельных линиях. Далее, по мере изменения координаты перемещения солнца, увеличивается угол облучения модуля СБ, что влечет за собой последующее снижение силы тока в геометрической прогрессии. Для определения значения выходной мощности СБ в диапазоне времени с 19:00 до 20:12 был применен метод аппроксимирования с возможностью прогнозирования заданной функции. Как видно на графике, суточная выработка электроэнергии не равномерная, и, как следствие, рабочим диапазоном модуля СБ является время с 10:00 до 16:00.

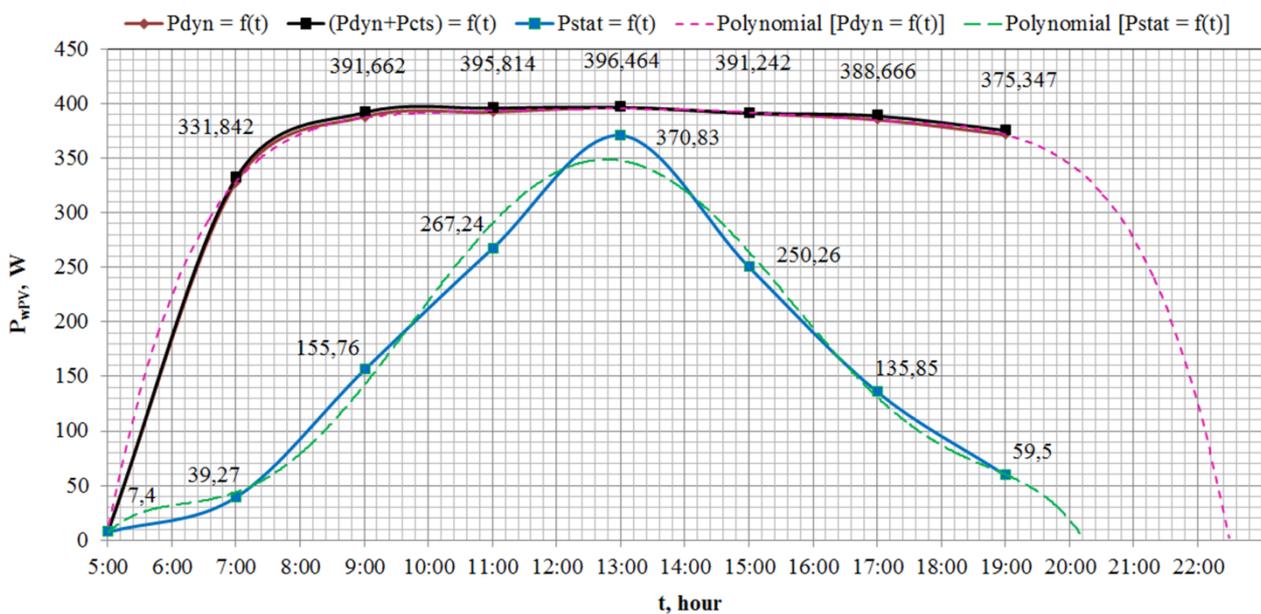


Рис. 4 – График зависимости выходной мощности статично и динамично расположенных модулей солнечных батарей от времени суток  
 Fig. 4 – Graph of output power of statically and dynamically located solar modules on the time of the day

Согласно графику зависимости  $P_{\text{dyn}} = f(t)$  (см. рис. 4), на всем рабочем диапазоне времени вырабатываемая модулем СБ мощность распределена более равномерно. Задействуется весь энергопотенциал СБ, так как рабочая поверхность модуля СБ на протяжении всего цикла солнечной активности подвергается максимальному солнечному излучению. Функция  $P_{\text{dyn}} = f(t)$  представляет собой зависимость выходной мощности динамично расположенного модуля солнечной батареи (за вычетом расхода энергии на систему ориентации) от времени суток, а графическая зависимость  $(P_{\text{dyn}} + P_{\text{cts}}) = f(t)$  – наоборот, с учётом мощности, потребляемой системой управления и электроприводами АДСТ. Аппроксимация с возможностью прогнозирования функции  $P_{\text{dyn}} = f(t)$  позволяет

установить характер генерирования электрической мощности СБ в диапазоне времени с 19:00 до 22:30.

Экспериментальное исследование работы АДСТ показало эффективность работы модуля СБ: так, среднее значение вырабатываемой мощности равно 332,445 Вт; суммарные потери (с учётом потерь на КНС) составляют 135,05 Вт. При сравнении значений работы модулей СБ в условиях статики и динамики за одни солнечные сутки можно отметить существенную эффективность работы АДСТ. С помощью системы АДСТ удалось сократить потери мощности почти в 4 раза и повысить производительность работы модуля СБ на 48,4 %.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные АСЭС о суточной генерации электроэнергии по датам: для фиксированных модулей СБ и модулей с АДСТ.



Таблица 2  
Среднесуточная выработка электроэнергии автономной солнечной станцией по датам  
Table 2  
Average daily power generation by an autonomous solar station by days of the week

| Дата     | Облачность | $I_{max}, A$ |        | $U_{wp}, B$ |        | $W, Вт \cdot ч$ |           |
|----------|------------|--------------|--------|-------------|--------|-----------------|-----------|
|          |            | Стат.        | Динам. | Стат.       | Динам. | Стат.           | Динам.    |
| 15.05.17 | пасмурно   | 3,4          | 3,5    | 23,2        | 23,3   | 764,56          | 815,5     |
| 16.05.17 | ясно       | 13,9         | 14,6   | 26,22       | 25,87  | 1 905,24        | 3 777,02  |
| 17.05.17 | ясно       | 14           | 14,36  | 25,87       | 25,7   | 1 929,15        | 3 690,52  |
| 18.05.17 | ясно       | 13,8         | 14,48  | 26,57       | 25,89  | 1 934,83        | 3 748,87  |
| 19.05.17 | пасмурно   | 2,8          | 2,7    | 24,7        | 24,1   | 669,65          | 677,7     |
| 20.05.17 | пасмурно   | 3,1          | 3,1    | 24,44       | 24,7   | 749,76          | 765,7     |
| 21.05.17 | пасмурно   | 3,2          | 3,3    | 24,1        | 24,5   | 759,56          | 808,5     |
| Итого    |            |              |        |             |        | 8 712,75        | 14 283,81 |

Для большей наглядности построен график зависимости выработанной электроэнергии АСЭС за сутки динамично и статично расположенными модулями СБ по датам (рис. 5).

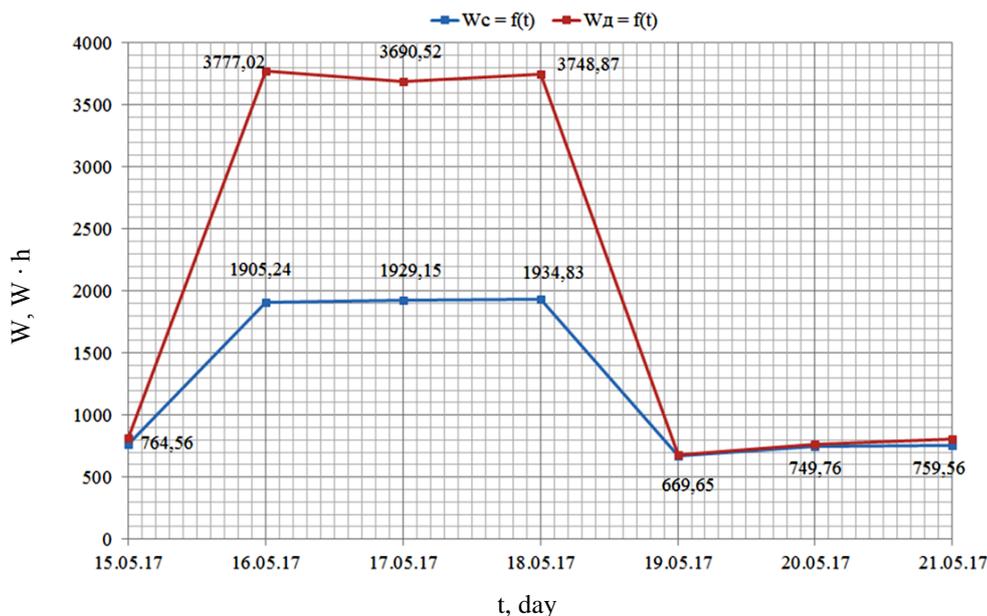


Рис. 5 – График зависимости среднесуточной электроэнергии, выработанной автономной солнечной станцией по датам при динамично и статично расположенных модулях солнечных батарей

Fig. 5 – Graph of the dependence of the average daily generated electricity of an autonomous solar station with dynamically and statically located solar modules by days of the week

Анализ выполненной работы показывает, что в солнечные дни эффективность АДСТ возрастает, и прирост генерации электроэнергии составляет более чем 50 %. В пасмурную погоду эффективность АДСТ незначительная, что связано с пассивным режимом работы системы слежения АДСТ. Следует отметить, что посуточные значения выработанной электроэнергии при использовании АДСТ в пасмурные периоды были выше, поскольку в эти дни кратковременно выходило солнце, и АДСТ успевал по-

зиционировать модули СБ под оптимальный угол и оптимизировать их работу.

### 5. Заключение

Разработана модернизированная структура автономной солнечной электростанции. Создана физическая модель АДСТ, которая позволяет проводить сбор и обработку экспериментальных данных.

Экспериментально подтверждена эффективность применения автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера. Согласно проведенным исследованиям, максимальный прирост мощности СЭС с использованием разработанного АДСТ составил 50 %. Выполнен анализ зависимости вырабатываемой мощности СЭС с применением АДСТ от времени суток.

Разработка имеет практическое применение, так как солнечная электростанция может стать основой для создания программно-аппаратного комплекса, формирующего статистические базы данных по выработке электроэнергии, что позволит провести технико-экономическое обоснование по строительству ФЭУ в конкретной географической точке.

### Список литературы

[1] Аржанов, К.В. Автоматизированная система непрерывно-дискретного слежения за Солнцем автономных фотоэлектрических энергоустановок с использованием шаговых двигателей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06 / Аржанов Кирилл Владимирович; [Место защиты: Том. гос. ун-т систем упр. и радиотехники (ТУСУР) РАН]. – Томск, 2016. – 178 с.

[2] Аржанов, К.В. Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на Солнце [Текст] / К.В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 139–146.

[3] Аржанов, К.В. Фотоэлектрическая энергетическая установка с наведением на Солнце [Текст] / К.В. Аржанов // Энергетика России В XXI веке. Инновационное развитие и управление. – 2015. – С. 579–581.

[4] Петрусёв, А.С. Солнечная энергетика для энергоснабжения удалённых районов [Текст] / А. С. Петрусёв; науч. рук. Б. В. Лукутин // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее : сборник научных трудов IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, г. Томск. 5-10 октября 2015 г.: в 3 т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2015. – Т. 1. – С. 155–158.

[5] Петрусёв, А.С. Повышение эффективности солнечных батарей с помощью одноосного трекера и акрилового концентратора [Текст] / Петрусёв А.С. // Современная техника и технологии. Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2014. – С. 37–38.

[6] Юрченко, А. В. Система слежения за Солнцем для солнечной энергоустановки [Текст] / А.В. Юрченко [и др.] // Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений, 2010. – С. 210–221.

[7] Kitaeva, M. Efficiency of PV systems with solar trackers for Russian regions [Текст] / M. Kitaeva, A.Yurchenko // Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST) 2012. – 2012.

[8] Шиняков, Ю.А. Автономная энергетическая установка с экстремальным шаговым регулятором мощности солнечных батарей [Текст] / Ю.А. Шиняков [и др.] // Международный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 8–9. – С. 12–18.

[9] Саврасов, Ф.В. Энергоэффективные системы электроснабжения с фотоэлектростанциями: автореф. дис. на соиск. учен. канд. техн. наук (05.09.03) / Саврасов Федор Витальевич; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2013. – 21 с.

[10] Рахматулин, И.Р. Разработка комплексной энергоэффективной солнечной опреснительной установки с системой слежения за Солнцем: автореф. дис. на соиск. учен. канд. техн. наук (05.09.03) / Рахматулин Ильдар Рафикович; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2015. – 19 с.

[11] Рахматулин, И.Р. Система ориентации солнечных коллекторов [Текст] / И.Р. Рахматулин // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 247–255.

[12] Рахматулин, И.Р. Математическая модель солнечной опреснительной установки с устройством слежения за солнцем [Текст] / И.Р. Рахматулин // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника – 2014. – № 1. – С. 110–115.

[13] ГОСТ Р 57229-2016 (МЭК 62817:2014). Системы фотоэлектрические. Устройства слежения за Солнцем. Технические условия. – Введ. 2017-09-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 67 с.

[14] Lee, K. Origami Solar-Tracking Concentrator Array for Planar Photovoltaics [Text] / K. Lee [et al.] // ACS Photonics – 2016. – Vol. 3. – No 11. – P. 2134–2140.

[15] Saranya Nair, M. A solar tracker assisted automatic irrigation system for agricultural fields [Text] / M. Saranya Nair, Karan Bhatia // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) – 2017. – Vol. 8. – No 10. – P. 279–287.

[16] Azizi, K. Design and Manufacturing of a High-Precision Sun Tracking System Based on Image Processing [Text] / K. Azizi, A. Ghaffari // International Journal of Photoenergy – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 754549. – 7 p.

[17] Gerek, Ö.N. Efficiency analysis of the solar tracking PV systems in Eskişehir region [Text] / Ö.N. Gerek, Ü.B. Filik // Anadolu university journal of science and technology a // Applied Sciences and Engineering – 2017. – Vol. 18. – No 1. – P. 209–217.

[18] Ozcelik, S. Two-axis solar tracker analysis and control for maximum power generation [Text] / S. Ozcelik, H. Prakash, R. Chaloo // Procedia Computer Science – 2011. – Vol. 6 – P. 457–462.

[19] Abid, A.J. Arduino based blind solar tracking controller [Text] / A.J. Abid // International Journal of Open Information Technologies – 2017. – Vol. 5. – No. 10. – P. 24–29.



[20] Kassem, A. A microcontroller-Based Multi-Function Solar Tracking System [Text] / A. Kassem, M. Hammad // 2011 IEEE International Systems Conference. – 2011. – P. 13–16.

[21] Mousazadeh, H. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output [Text] / H. Mousazadeh [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2009. – P. 1800–1818.

[22] Wang, J.-M. Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System [Text] / J.-M. Wang, C.-L. Lu // Sensors – 2013. – Vol. 13. – Iss. 3 – P. 3157–3168.

[23] Magibalan S. Fabrication of dual axis solar tracking system [Text] / S. Magibalan [et al.] // International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research – 2018. – Vol. 5. – Iss. 3. – P. 1109–1113.

[24] Митрофанов, С.В. Методика расчета мощности автономной солнечной электростанции для нужд освещения лаборатории энергосбережения и энергоэффективности [Текст] / С.В. Митрофанов, А.Ю. Немальцев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет – 2017. – С. 333–337.

[25] Немальцев, А.Ю. Описание и принцип работы автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера [Текст] / А.Ю. Немальцев, С.В. Митрофанов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды VIII Всероссийской научно-технической конференции. – 2016. – С. 12–14.

[26] Митрофанов, С.В. Разработка системы управления солнечным трекером на основе микроконтроллера Arduino [Текст] / С.В. Митрофанов, А.В. Потехенченко, А.Ю. Немальцев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2017. – С. 470–473.

[27] Митрофанов, С.В. Использование микроконтроллеров в системе управления солнечным трекером [Текст] / С.В. Митрофанов, А.В. Потехенченко, А.Ю. Немальцев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2017. – С. 345–347.

[28] Митрофанов, С.В. Переносная солнечная электростанция с автономной системой слежения за солнцем [Текст] / С.В. Митрофанов, А.Ю. Немальцев // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды VII Всероссийской научно-технической конференции. Материалы сборника опубликованы в авторской редакции. – 2014. – С. 40–44.

[29] Митрофанов С.В. Система безопасности солнечной электростанции от порывов ветра [Текст] / С.В. Митрофанов, А.В. Потехенченко // Университетский комплекс как региональный центр образова-

ния, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2017. – С. 466–469.

[30] Митрофанов С.В. Потехенченко А.В. Метод защиты солнечной электростанции от накопления снега и льда [Текст] / С.В. Митрофанов, А.В. Потехенченко // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2017. – С. 462–465.

## References

[1] Arzhanov K.V. An automated discrete-continuous sun-tracking system of autonomous photovoltaic power plants with stepper motors (Avtomatizirovannaya sistema nepreryvno-diskretnogo slezheniya za Solntsem avtonomnykh fotoelektricheskikh energoustanovok s ispol'zovaniem shagovykh dvigatelei): Ph.D. diss (engineering). Tomsk, 2016, 178 p. (in Russ.).

[2] Arzhanov K.V. Dual-axis solar tracking system (Dvukhkoordinatnaya sistema navedeniya solnechnykh batarei na Solntse), *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014;324(4):139–146 (in Russ.).

[3] Arzhanov K.V. Sun Tracking Photovoltaic Systems (Fotoelektricheskaya energeticheskaya ustanovka s navedeniem na Solntse), *Energetika Rossii V XXI veke. Innovatsionnoe razvitie i upravlenie*, 2015:579–581 (in Russ.).

[4] Petrusev A.S. Solar energy for power supply in remote regions (Solnechnaya energetika dlya energosnabzheniya udalennykh raionov), *Resursoeffektivnye sistemy v upravlenii i kontrole: vzglyad v budushchee*, 2015;1:155–158 (in Russ.).

[5] Petrusev A.S. Increasing the energy efficiency of solar batteries of using single-axis solar tracker and acrylic concentrator (Povyshenie effektivnosti solnechnykh batarei s pomoshch'yu odnoosnogo trekera i akrilovogo kontsentratora), *Sovremennye tekhnika i tekhnologii*, 2014:37–38 (in Russ.).

[6] Yurchenko A.V. A solar tracking system installed with photovoltaic installation (Sistema slezheniya za Solntsem dlya solnechnoi energoustanovki), *Resursoeffektivnye tekhnologii dlya budushchikh pokolenii*, 2010:210–221 (in Russ.).

[7] Kitaeva M., Yurchenko A. Efficiency of PV systems with solar trackers for Russian regions. *Proceedings – 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST–2012)*, 2012;2:103–106 (in Eng.).

[8] Shinyakov Y.A., Otto A.I., Osipov A.V., Chernaya M.M. Optimizing peak-holding controller solar battery autonomous energy installation. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)* 2015;(8–9):12–18. (In Russ.).

[9] Savrasov F.V. Energy-efficient power supply systems with photovoltaic power plants (Energoeffektivnye sistemy elektrosnabzheniya s fotoelektrostantsiyami): theses of Ph.D. diss. (engineering). Tomsk, 2013, 21 p. (In Russ.).



[10] Rakhmatulin I.R. Design complex energy-efficient solar-powered desalination plant with solar tracking system (Razrabotka kompleksnoi energoeffektivnoi solnechnoi opresnitel'noi ustanovki s sistemoi slezheniya za Solntsem) : theses of Ph.D. diss. (engineering). Chelyabinsk, 2015, 19 p. (in Russ.).

[11] Rakhmatulin I.R. System for orienting solar thermal collector (Sistema orientatsii solnechnykh kollektorov), *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2012;20:247–255 (in Russ.).

[12] Rakhmatulin I.R. Mathematical model of solar-powered desalination plant with solar tracking system (Matematicheskaya model' solnechnoi opresnitel'noi ustanovki s ustroystvom slezheniya za solntsem), *Bulletin of the South Ural State University*, 2014;1:110–115 (in Russ.).

[13] State Standart R 57229-2016 (IEC 62817:2014). Photovoltaic system. Solar tracking system. Technical specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 67 p. (in Russ.).

[14] Lee K., Chien C.-W., Lee B., Lamourex A., Shlian M., Shtein M., Ku P.C., Forrest S. Origami Solar-Tracking Concentrator Array for Planar Photovoltaics. *ACS Photonics*, 2016; 3(11):2134–2140 (in Eng.).

[15] Saranya Nair M., Bhatia K. A solar tracker assisted automatic irrigation system for agricultural fields. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 2017;8(10):279–287 (in Eng.).

[16] Azizi K., Ghaffari A. Design and Manufacturing of a High-Precision Sun Tracking System Based on Image Processing. *International Journal of Photoenergy*, 2013;2013:1–7 (in Eng.).

[17] Gerek Ö.N., Filik Ü.B. Efficiency analysis of the solar tracking PV systems in Eskişehir region. *Anadolu university journal of science and technology A – Applied Sciences and Engineering*, 2017;18(1):209–217 (in Eng.).

[18] Ozcelik S., Prakash H., Chaloo R. Two-axis solar tracker analysis and control for maximum power generation. *Procedia Computer Science*, 2011;6:457–462 (in Eng.).

[19] Abid A.J. Arduino based blind solar tracking controller. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017;5(10):24–29 (in Eng.).

[20] Kassem A., Hammad M. A microcontroller-Based Multi-Function Solar Tracking System. *2011 IEEE International Systems Conference*, 2011:13–16 (in Eng.).

[21] Mousazadeh H., Keyhani A., Javadi A., Sharifi A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009:1800–1818 (in Eng.).

[22] Wang J.-M., Lu C.-L. Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System. *Sensors*, 2013;13(3):3157–3168 (in Eng.).

[23] Magibalan S., Saravanan M., Sathees kumar G., Sathish, C. Saravanan G. Fabrication of dual axis

solar tracking system. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2018;5(3):1109–1113 (in Eng.).

[24] Mitrofanov S.V., Nemaľtsev A.Yu. Method of calculating the power of autonomous solar power plants for lighting load of laboratory of energy-saving and energy efficiency (Metodika rascheta moshchnosti avtonomnoi solnechnoi elektrostantsii dlya nuzhd osveshcheniya laboratorii energosberezheniya i energoeffektivnosti), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:333–337 (in Russ.).

[25] Nemaľtsev A.Yu., Mitrofanov S.V. Description of the dual-axis solar tracker working principle (Opisanie i printsip raboty avtomatizirovannogo dvukhkoordinatnogo solnechnogo trekera), *Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy : Trudy VIII Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*, 2016:12–14 (in Russ.).

[26] Mitrofanov S.V., Potekhenchenko A.V., Nemaľtsev A.Yu. Development of the control system of a solar tracker based on the Arduino microcontroller (Razrabotka sistemy upravleniya solnechnym trekerom na osnove mikrokontrollera Arduino), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:470–473 (in Russ.).

[27] Mitrofanov S.V., Nemaľtsev A.Yu. Using microcontrollers in a solar tracking control system (Ispol'zovanie mikrokontrollerov v sisteme upravleniya solnechnym trekerom), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:345–347 (in Russ.).

[28] Nemaľtsev A.Yu., Mitrofanov S.V. Portable solar power plant with autonomous solar tracking system (Perenosnaya solnechnaya elektrostantsiya s avtonomnoi sistemoi slezheniya za solntsem), *Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy: Trudy VII Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*, 2014:40–44 (in Russ.).

[29] Mitrofanov S.V., Potekhenchenko A.V. Wind protection for solar power plant (Sistema bezopasnosti solnechnoi elektrostantsii ot poryvov vetra), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:466–469 (in Russ.).

[30] Mitrofanov S.V., Potekhenchenko A.V. Method of protection of solar power station against accumulation of snow and ice (Metod zashchity solnechnoi elektrostantsii ot nakopleniya snega i l'da), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:462–465 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

