

ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

М.В. Черемухин

m.v.cheremukhin@gmail.com

SPIN-код: 6091-5842

А.В. Шиповский

aleksandr-shipovskijj@rambler.ru

SPIN-код: 7104-0545

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Работа посвящена оценке эффективности систем ориентации солнечных батарей для наземных солнечных электростанций. Проведен анализ проблемы использования гелиотрекеров. Представлены теоретические оценки увеличения выработки электроэнергии при применении систем слежения за Солнцем. Для проведения натурных испытаний разработана установка для сравнения эффективности выработки энергии ориентируемых и статичных фотоэлектрических преобразователей. В результате проведенных опытов выяснилось, что для центральной России применение опорно-поворотного устройства, осуществляющего ориентирование поверхности солнечных батарей, позволяет повысить генерацию электроэнергии более чем на 35 %. Также дано заключение об экономической целесообразности использования систем слежения за положением Солнца.

Ключевые слова

Солнечная энергетика, гелиотрекер, система ориентации, солнечная батарея

Поступила в редакцию 11.01.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) с каждым годом набирают все большую популярность во всем мире. Наиболее динамично развивающимся направлением в этой области является фотовольтаика, практическое значение которой состоит в прямом преобразовании энергии солнечного излучения в электричество. В 2017г. мировая суммарная электрическая мощность всех генерирующих солнечных электростанций (СЭС), использующих фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), составила более 403 ГВт. Гелиоэнергетика опережает все остальные виды ВИЭ по темпам роста. За 2017 г. электрическая мощность, вырабатываемая СЭС во всем мире, возросла на 100 ГВт [1].

Использование энергии Солнца привлекательно в свете исчерпаемости традиционных источников энергии. При этом гелиоэнергетика характеризуется наибольшей простотой в применении и экологической безопасностью. Известно, что мощность электромагнитного солнечного излучения, попадающего на Землю, многократно превышает потребности человечества в электроэнергии.

Солнечные электростанции легко масштабируемы и наиболее актуальны для использования в местах, где отсутствует централизованное электроснабжение. Однако данный вид генерации энергии сопровождается некоторыми особенностями. На эффективность выработки энергии фотоэлектрическим преобразователем, являющимся ключевым элементом солнечной батареи, влияют географические и климатические условия, а также угол падения лучей на поверхность ФЭП. Последний аспект может быть урегулирован благодаря устройствам автоматической ориентации поверхности солнечных батарей на Солнце в течение дня. Данные устройства, получившие название солнечных трекеров, или гелиотрекеров, позволяют значительно увеличить эффективность работы СЭС благодаря максимизации потока солнечной радиации, попадающей на поверхность ФЭП, что особенно актуально в утренние и вечерние часы. Однако применение гелиотрекера приводит к усложнению конструкции электростанции и повышению капитальных затрат на ее постройку. Важной задачей при оценке эффективности применения солнечных трекеров является определение экономической выгоды от внедрения поворотных устройств.

Состояние проблемы. На данный момент централизованное электроснабжение отсутствует на 70 % территории нашей страны. Примерно 20 млн человек генерируют электрическую энергию для своих нужд самостоятельно [2]. В основном они применяют дизельные установки с достаточно высокой ценой вырабатываемой энергии. Доля солнечной генерации в РФ очень мала — около одной тысячной доли процента всей мощности, производимой на территории страны [3].

В последние годы в Российской Федерации идет активное внедрение солнечной энергетики в районах с высокой солнечной инсоляцией, которая на территории страны изменяется от 810 кВт·ч/м² в год в северных районах до 1400 кВт·ч/м² в год в южных [3]. Например, в Республике Алтай в 2015 г. была введена в эксплуатацию Кош-Агачская СЭС максимальной мощностью 10 МВт. В республике Башкортостан в ноябре 2016 г. построена Бугульчанская СЭС совокупной мощностью 15 МВт. На этих и многих других российских солнечных электростанциях отсутствует система ориентации солнечных батарей, в результате чего потенциал фотоэлектрических преобразователей используется не полностью. Согласно разным данным, применение гелиотрекера позволяет повысить вырабатываемую солнечными батареями мощность на 30...50 % в день [4–9].

В настоящее время используются различные типы солнечных электростанций, предназначенных для выработки электроэнергии, в числе которых: СЭС со статично установленными солнечными батареями, СЭС с одно- или двухосевыми трекерами, представляющими собой опорно-поворотные устройства (ОПУ) с одной или двумя осями вращения соответственно, на которые крепятся солнечные батареи (СБ). Одноосевые трекеры конструктивно несколько проще двухосевых, но проигрывают последним в прибавке мощности. Гелиотрекеры должны отвечать требованиям безотказности работы в тех климатических условиях, где располагается СЭС, точности позиционирования и низкой стоимости.

Оценка увеличения мощности СЭС при использовании трекера с ОПУ.

Солнечное излучение, доходящее до поверхности Земли, бывает прямым и рассеянным (диффузным). Доля рассеянного излучения зависит от положения Солнца на небосводе и в ясные дни составляет примерно 10 %. Мощность, вырабатываемая ФЭП, зависит от потока излучения, проходящего через лучепоглощающую поверхность ФЭП. Она максимальна, когда поверхность ортогональна направлению прямого излучения. Если угол падения лучей по отношению к нормали равен i , то уменьшение потока прямого излучения составляет $(1 - \cos i)$ (рис. 1).

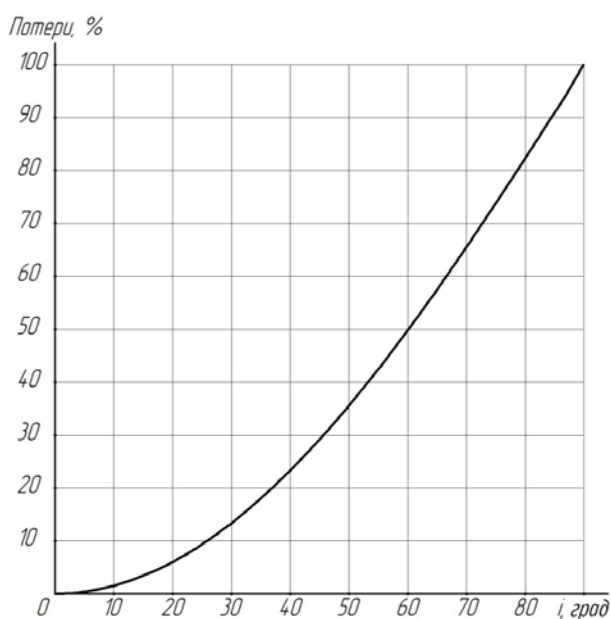


Рис. 1. Потери в солнечной электрической установке при отклонении падения лучей от нормали СБ

Угол между определенным направлением на Земле и Солнцем на небосводе зависит от географических координат точки наблюдения, времени дня и года. Значение угла склонения δ , меняющегося в течение года в пределах $-23,45^\circ$ до $+23,45^\circ$ в конечном итоге определяет, какой путь проходит Солнце за день по небосводу. Схема перемещения Солнца относительно неподвижного наблюдателя представлена на рис. 2. Азимутальный угол, отсчитываемый от направления на Север, обозначим α . Его можно найти по формуле [10]:

$$\begin{cases} \alpha = \arccos\left(\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos H}{\cos \beta}\right) \text{ при } H < 0; \\ \alpha = 2\pi - \arccos\left(\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos H}{\cos \beta}\right) \text{ при } H > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где φ — широта местоположения; β — угол возвышения в солнечный полдень (учитывает долготу); H — часовой угол, переводящий местное солнечное время

в количество градусов, которое Солнце проходит по небу (каждый час оно проходит 15° , $H < 0$ — до солнечного полудня, $H > 0$ — после).

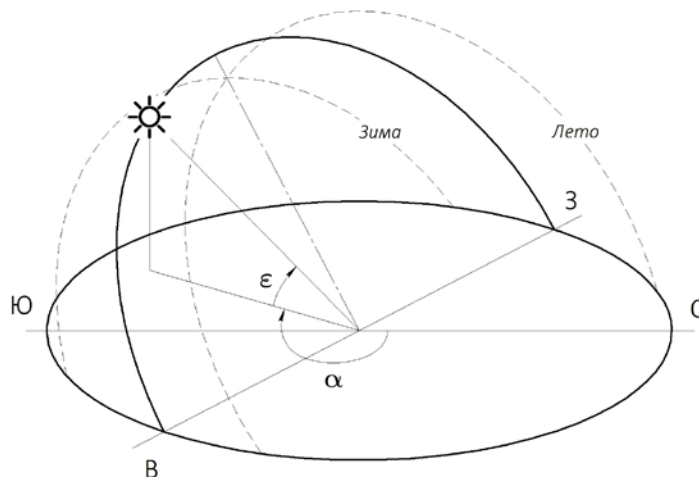


Рис. 2. Схема движения Солнца по небосводу

Угол возвышения ϵ можно найти по следующей формуле [10]:

$$\epsilon = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos H). \quad (2)$$

При двухосной ориентации поверхность СБ отслеживает направление на Солнце, и угол $i=0$ в любой момент времени. Но при этом возникает задача перевода координат положения Солнца на небосводе в углы осей поворота ОПУ, а формулы перевода зависят от конструкции гелиотрекера. Одноосевой трекер не может все время отслеживать положение Солнца, поскольку оно совершает двумерное движение относительно наблюдателя на Земле: вращается по окружности и смещается с окружностью, таким образом совершая дневное и годовое движение Солнца по небосводу. Неподвижная СБ оказывается расположенной ортогонально солнечным лучам только два дня в году, и то только в солнечный полдень.

Выполним оценку увеличения мощности СЭС с гелиотрекером по сравнению с неподвижной СЭС. Для упрощения сделаем несколько допущений:

- 1) день ясный, доля рассеянного излучения пренебрежимо мала;
- 2) в солнечный полдень этого дня лучи падают по нормали к поверхности ФЭП.

Как уже было сказано выше, если угол падения лучей i по отношению к нормали, то уменьшение потока прямого излучения составляет $(1 - \cos i)$. Текущее значение мощности, вырабатываемой СЭС, составляет

$$W(i) = W_0 \cos i, \quad (3)$$

где W_0 — мощность ФЭП при $i=0$, пропорциональная солнечной инсоляции для данного региона в данное время года. За равные промежутки времени

Солнце проходит по небосводу равные угловые расстояния. Поскольку угол i прямо пропорционален времени, проинтегрировав выражение (3) по углу i , получим энергию, выработанную статичной СЭС в течение дня:

$$A_{\text{стат}} = 2W_0 \int_0^{\pi/2} \cos i \, di = 2W_0 \left(\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) - \sin 0 \right) = 2W_0.$$

Для ориентируемой системы $\cos i = 1$, тогда

$$A_{\text{ориент}} = 2W_0 \int_0^{\pi/2} di = 2W_0 \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right) = \pi W_0,$$

$$\frac{A_{\text{ориент}}}{A_{\text{стат}}} = 1,57.$$

Таким образом, ориентируемая СЭС теоретически способна вырабатывать на 57 % больше энергии по сравнению с неподвижной. Однако такая прибавка несправедлива для массива ориентируемых СЭС, поскольку в таком случае на восходе и закате ближайшие к солнцу СЭС из этого массива будут затенять остальные.

Положим, что расстояние между СЭС массива обеспечивает не затенение, а угол i на восходе и закате равен 30° . Тогда СЭС работает в режиме ориентации при $60^\circ > i > -60^\circ$, а при остальных углах — как неподвижная. В таком случае

$$A_{\text{ориент}} = 2W_0 \int_0^{\pi/3} di + 2W_0 \int_0^{\pi/6} \cos i \, di = 2W_0 \left(\frac{\pi}{3} + \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right) \approx 3W_0,$$

$$\frac{A_{\text{ориент}}}{A_{\text{стат}}} = 1,50.$$

Соответственно, выработка такого массива СЭС будет на 50 % больше по сравнению со статичной.

Описание экспериментальной установки. Для проверки оценки прибавки мощности СЭС в результате использования гелиотрекеров была создана опытная модель гелиотрекера с полярно-ориентированной осью.

Экспериментальная модель трекера (рис. 3) представляет собой основание 5, на котором закреплены стойки для поддержки общей горизонтальной оси вращения. К общей оси прикреплены полярные оси вращения, на которые помещены ФЭП 2. Неподвижная панель 3, регулируемая по углу наклона, установлена на основании для сравнения мощности. Особенностью модели является то, что с помощью всего двух сервоприводов 1 осуществляется вращение всего массива батарей. Благодаря сервоприводам, управляемым микроконтроллером, осуществляется позиционирование преобразователей, а на дисплей 4 и персональный компьютер выводится информация о работе модели.

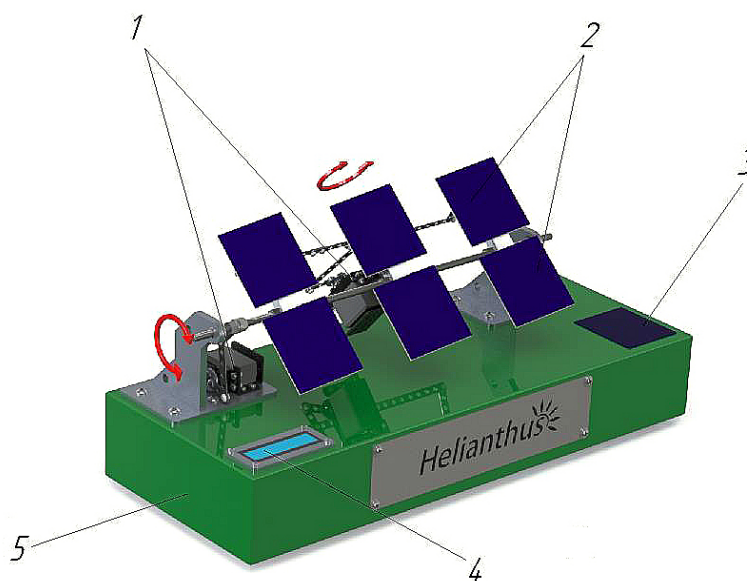


Рис. 3. 3D-модель опытного гелиотрекера
(стрелками обозначены направления вращения осей):

1 — сервоприводы; 2 — ориентируемые ФЭП; 3 — неподвижная ФЭП;
4 — дисплей для отображения информации; 5 — основание

Выбор схемы ОПУ с полярно-ориентированной осью обусловлен наибольшей экономичностью и простотой. Полярно-ориентированная ось располагается под углом к горизонту, равным широте точки наблюдения. Для исключения затенения массива, состоящего из трех ФЭП, угол полярной оси регулируется в диапазоне $30...50^\circ$. В установке были использованы гетероструктурные ФЭП производства компании «Хевел».

Основой системы управления гелиотрекера является микроконтроллер STM32F100C8T6, в котором заложена программа расчета углов по формулам (1) и (2) и преобразование этих углов для полярно-ориентированного ОПУ. Входными параметрами являются: текущее время, которое микроконтроллер получает от блока часов реального времени, часовой пояс и местоположение. Сигналы на поворот поступают на сервоприводы соответствующих осей.

Блок-схема блока управления экспериментальной установки представлена на рис. 4.

Особенностью системы управления экспериментальной установкой является то, что никакие сигналы о положении Солнца не поступают извне. В этом случае отпадает необходимость в использовании различных фотодатчиков, которые не обеспечивают требуемой надежности системы, поскольку на них воздействуют неблагоприятные факторы окружающей среды. В экспериментальной модели благодаря реализующемуся алгоритму происходит пересчет координат положения Солнца в углы поворота осей гелиотрекера.

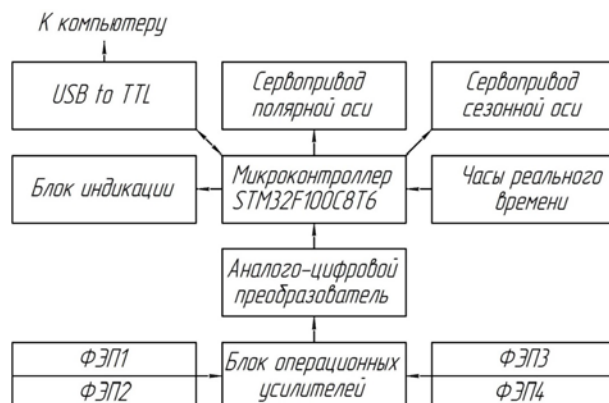


Рис. 4. Блок-схема опытной модели гелиотрекера

С помощью блока операционных усилителей и аналого-цифрового преобразователя методом короткого замыкания измеряется мощность на трех ориентированных ФЭП и одного неподвижного. Микроконтроллер получает данные о мощности и посредством преобразователя интерфейса “USB to TTL” передает данные на компьютер, где они записываются в таблицу.

Опытная модель гелиотрекера во время работы показана на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид миниатюрного гелиотрекера в процессе снятия показаний

Результаты испытаний. Эксперимент проводили в течение одного дня с малой облачностью в середине июля 2017 г. Опытная модель обеспечивала точное наведение ФЭП на солнце на возвышении в г. Москве (долгота $37,687905^\circ$, широта $55,770395^\circ$). Неподвижный ФЭП располагался под углом 40° к горизонту, т. е. под оптимальным углом для летнего периода. Графики мощности в зависимости от текущего времени представлены на рис. 6. Площадь под первой кривой больше площади под второй в 1,355 раз, соответственно, прибавка к выработке составила 35,5 %.

Заметим, что эти результаты справедливы для малооблачного летнего дня, исследование среднегодовой прибавки к выработке планируется провести в дальнейших работах.

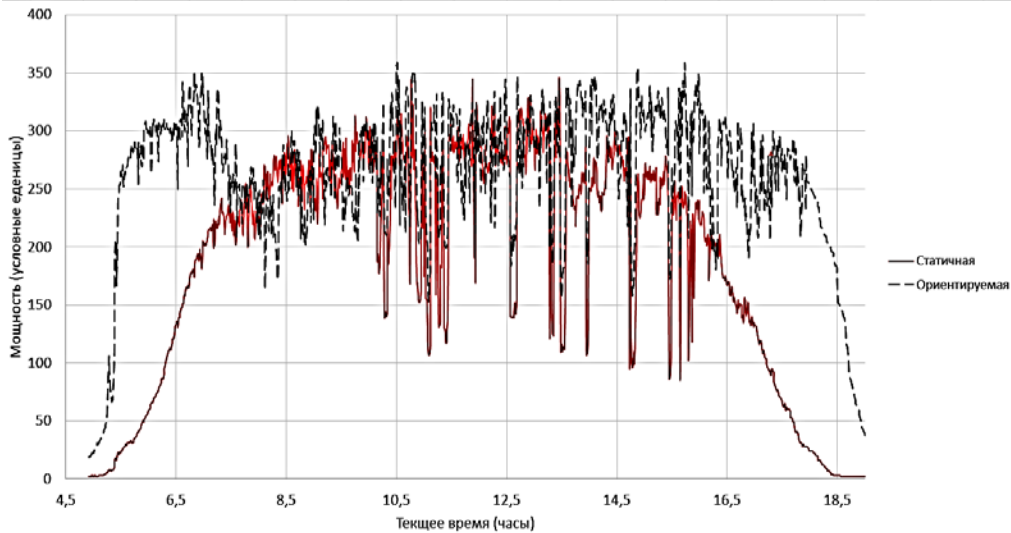


Рис. 6. Зависимости мощности ориентируемой и статичной ФЭП в зависимости от текущего времени

Оценка экономической выгоды при применении гелиотрекера. Постройка СЭС с гелиотрекером должна быть экономически оправдана. Это значит, что выгода от применения трекера должна превышать дополнительные затраты на постройку и обслуживание ОПУ. Применение гелиотрекером зачастую приводит к увеличению площади земли, выделяемой под СЭС во избежание затенения СБ при их вращении. Вся эта территория требует предмонтажной подготовки. Затраты на замену неподвижных стоек опорно-поворотными устройствами, которые для экономии должны быть объединены по модульному принципу и иметь общие приводы, являются основными. Также в статье затрат необходимо включить периодическое обслуживание трекеров, а при проектировании следует учесть, что их ресурс не должен быть меньше ресурса СБ. В первом приближении доля, на которую повышаются капитальные затраты на постройку СЭС при применении трекеров по сравнению с затратами на постройку статичной СЭС, должна быть меньше доли повышения генерации, либо суммарная стоимость СЭС с трекером должна быть такой же, как и без него с учетом уменьшения количества СБ до эквивалентного. Если сделать трекер более дешевым не удастся, его использование нецелесообразно.

В некоторых случаях выгода от применения трекеров представляет особый интерес. Трекеры значительно расширяют диапазон времени, в которое вырабатывается максимальная мощность. Кроме того, в зимнее время снег сам счищается с батарей при их вращении.

Заключение. Изучение применения гелиотрекером крайне важно, поскольку основная загруженность электрических сетей потребителем наблюдается в начале и конце суток, что затрудняет эффективное использование солнечных электростанций без накопителей энергии. Весомое достоинство подобных систем заключается не только в повышении выработки, но и в наиболее выгодном

времени выработки максимальной мощности, которая в это время (в начале и в конце суток) имеет наиболее высокую стоимость.

На основании проведенных оценок и измерений можно сделать вывод, что применение опорно-поворотных устройств, осуществляющих ориентацию СБ в составе солнечных электростанций, существенно повышает выработку электроэнергии и дает СЭС с гелиотрекером некоторые другие преимущества по сравнению с неподвижными СЭС. Однако в связи со значительными затратами на постройку и обслуживание использование ОПУ не всегда является экономически обоснованным, поэтому такие системы пока не получили широкого распространения.

Данное научное исследование проводится при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» по теме «Разработка солнечной электроустановки с гелиотрекером нового типа» в рамках договора № 10833ГУ/2016 от 29.12.2016 г. и Бизнес-инкубатора МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Литература

- [1] Global Solar Market Demand to Reach 100 GW in 2017. Solar Power Europe. SolarPower Summit, Brussels, 7–8 March 2017.
- [2] Петрусов А.С. МИП по производству энергоэффективных солнечных установок. *Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Т. 5. Томск, Изд-во ТПУ, 2016, с. 184–186.
- [3] Ахмадуллин Р.Р. Перспективы развития проекта «Солнечная энергетика» в России. *Роль науки в развитии общества*. Уфа, АЭТЕРНА, 2015, с. 24–27.
- [4] Петрусов А.С., Юрченко А.В. Эффективный способ увеличения мощности солнечных установок. *Физика*, 2014, № 2 (960), с. 4–8.
- [5] Петрусов А.С. Разработка энергоэффективной солнечной установки. *Известия ТПУ*, 2006, т. 309, № 7, с. 172–176.
- [6] Петрусов А.С. Повышение эффективности солнечных батарей с помощью одноосного трекера и акрилового концентратора. *Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Т. 1. Томск, Изд-во ТПУ, 2014, с. 37–38.
- [7] Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Осипов А.В., Теушаков О.А., Аржанов К.В. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок. *Доклады ТУСУР*, 2011, № 2 (24), ч. 1, с. 282–287.
- [8] Rizk J., Chaiko Y. Solar tracking system: more efficient use of solar panels. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, no. 41, pp. 313–315.
- [9] Sarker M.R.I., Pervez M.R., Beg R.A. Design, fabrication and experimental study of a novel two-axis sun tracker. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 2010, vol. 10, no. 01, pp. 13–18.
- [10] Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. *Расчет систем солнечного теплоснабжения*. Москва, Энергоиздат, 1982, 80 с.

Черемухин Михаил Васильевич — студент кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Шиповский Александр Викторович — студент кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Онуфриев Валерий Валентинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**EVALUATION OF THE SOLAR POWER STATIONS OPERATIONAL
EFFICIENCY INCREASE DUE TO THE APPLICATION
OF THE SOLAR BATTERIES POSITION CONTROL SYSTEMS**

M.V. Cheremukhin

m.v.cheremukhin@gmail.com

SPIN-code: 6091-5842

A.V. Shipovskiy

aleksandr-shipovskij@rambler.ru

SPIN-code: 7104-0545

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This work is devoted to the assessment of the solar batteries position control systems efficiency. It analyzes the problems of using the Helio Trackers. We present theoretical estimates of the power generation increase when using the solar tracking systems. To conduct the full-scale tests we have developed an installation for comparing the power generation efficiency of the orientable and static photoelectric transducers. Through the trials conducted we found out that for the central part of the country the application of the swivel bearing, enabling the solar batteries surface to orient, allows increasing the power generation by more than 35%. Furthermore, we give an opinion regarding the economic efficiency of using the tracking systems for monitoring the Sun position.

Keywords

Solar energy, Helio Tracker, position control system, solar battery

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Global Solar Market Demand to Reach 100 GW in 2017. Solar Power Europe. SolarPower Summit, Brussels, 7–8 March 2017.
- [2] Petrusev A.S. MIP po proizvodstvu energoeffektivnykh solnechnykh ustanovok [Small innovative enterprise producing energy-effective solar stations]. *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk: sbornik nauchnykh trudov XIII Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. T. 5* [Development prospects of abstract sciences: proc. XIII Int. Conf. of Students, Aspirants and Young Scientists. Vol. 5]. Tomsk, TPU publ., 2016, pp. 184–186.
- [3] Akhmadullin R.R. Perspektivy razvitiya proekta “solnechnaya energetika” v Rossii. Rol' nauki v razvitii obshchestva [Development prospects of “solar energetics” project in Russia. In: Role of science in society development]. Ufa, AETERNA publ., 2015, pp. 24–27.
- [4] Petrusev A.S., Yurchenko A.V. Effective method of increasing solar stations power. *Fizika*, 2014, no. 2 (960), pp. 4–8.
- [5] Petrusev A.S. Development of energy-effective solar station. *Izvestiya TPU*, 2006, vol. 309, no. 7, pp. 172–176.
- [6] Petrusev A.S. Povyshenie effektivnosti solnechnykh batarey s pomoshch'yu odnoosnogo trekera i akrilovogo konsentratora [Raising efficiency of solar batteries using monoaxial tracker and acrylic concentrator]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sbornik trudov XX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh*

- uchenykh. T. 1* [Modern technique and technologies: proc. XX Int. Sci.-Practice Conf. of Students, Aspirants and Young Scientists]. Tomsk, TPU publ., 2014, pp. 37–38.
- [7] Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., Arzhanov V.V., Osipov A.V., Teushchakov O.A., Arzhanov K.V. Stand-alone photovoltaic power plant with increased energy efficiency. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR], 2011, no. 2 (24), P. 1, pp. 282–287.
- [8] Rizk J., Chaiko Y. Solar tracking system: more efficient use of solar panels. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, no. 41, pp. 313–315.
- [9] Sarker M.R.I., Pervez M.R., Beg R.A. Design, fabrication and experimental study of a novel two-axis sun tracker. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 2010, vol. 10, no. 01, pp. 13–18.
- [10] Beckman W.A., Klein S.A., Duffie J.A. *Solar heating design by the F-chart method*. New York, John Wiley and Sons, 1977, 218 p. (Russ. ed.: *Raschet sistem solnechnogo teplosnabzheniya*. Moscow, Energoizdat publ., 1982, 80 p.)

Cheremukhin M.V. — student, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Shipovskiy A.V. — student, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — V.V. Onufriev, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.