

СОЛНЕЧНЫЙ ТРЕКЕР С СИСТЕМОЙ САМОРАСКРЫТИЯ

Г.Н. Рявкин¹, Е.В. Соломин¹, К. Мадемлис^{1, 2},
А.А. Ковалёв¹, Б.Т. Погорелов¹, П.А. Юнусов³

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Университет Аристотеля в Салониках, г. Салоники, Греция,

³ Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,
г. Душанбе, Республика Таджикистан

В данной статье дан краткий обзор состояния солнечной энергетики в мире. Рассмотрены недостатки ископаемых источников энергии. В качестве основного недостатка возобновляемых источников энергии в работе рассматривается низкий коэффициент полезного действия. Проанализирован возможный путь повышения КПД солнечных модулей за счет использования систем слежения за Солнцем (ССС). СССР – специальные устройства, имеющие два привода: горизонтальной и вертикальной наводки, которые при помощи специального алгоритма позиционируют солнечные модули в сторону наибольшего светового потока и тем самым повышают выработку электроэнергии. Рассчитан теоретический прирост выработки для систем в идеальных условиях, даны практические значения данной величины. Перечислены недостатки рассматриваемого типа электрогенераторов на ВИЭ. Произведен расчет ветровых нагрузок на СССР по представленной методике. Приведены примеры разрушения солнечных электростанций стихийными бедствиями. Предложен новый тип солнечного трекера с системой самораскрытия, способной сохранить установку от неблагоприятных погодных условий. Проведено сравнение точности алгоритма позиционирования, созданного для данного устройства. Вывод содержит возможные пути применения установки, ее недостатки, а также планы на будущие исследования.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, солнечный трекер, стихийные бедствия.

Введение

Солнечная энергетика стремительно развивается по всему миру. Установленная мощность солнечных электростанций на 2018 год достигает 505 ГВт [1]. В течение того же года 45 ГВт генерирующих мощностей было установлено в Китае, 10,6 ГВт – в США, 6,5 ГВт – в Японии, 3 ГВт – в Германии – именно эти страны наиболее активно развивают солнечную энергетику.

С 2017 года корпорация Google LLC полностью обеспечивает свои потребности энергией от возобновляемых источников. На данный момент компания закупила около 26 МВт·ч возобновляемой энергии [2]. Корпорация Apple полностью обеспечивает Apple Park возобновляемой энергией с 2017 года. В 2018 году их дата-центры потребили 1,3 млн кВт·ч экологически чистой энергии [3].

Крупнейшие нефтегазовые компании Shell и British Petroleum инвестируют в развитие солнечных и ветряных электростанций, а также разрабатывают сценарии низкоуглеродного будущего энергетики [4, 5].

Такая тенденция объясняется следующими недостатками ископаемых источников:

- Исчерпаемость. Изучение данной проблемы весьма затруднено: каждый год открываются новые залежи, но вместе с этим растет и потребление. В конечном итоге добыча ископаемых источников энергии становится все более затруднитель-

ной, а их количество ограничено. Согласно [6], разведанных запасов на 2018 год, при сохранении потребления, хватит лишь на 50 лет.

- Цена. Стоимость ветро- и солнечных электрогенераторов на современном рынке снижается, как следствие, «зеленый» кВт·ч в ряде стран обходится потребителям на уровне обычного [7, 8].

- Парниковые газы. Потребление энергии растет с каждым годом, а значит, увеличиваются и выбросы в атмосферу. По данным [9] за 2018 год прирост CO₂ составил 2 %, что эквивалентно 650 млн тонн. О вреде парниковых газов известно уже давно, в частности, они способствуют задержанию тепла в атмосфере и повышают среднюю температуру на Земле. Изменение климата на доли градуса влечет за собой нарушения в поведении флоры и фауны, что, в свою очередь, приводит к экологическим катастрофам [10].

Широко применение традиционного топлива обусловлено тем, что процесс добычи, переработки и использования уже давно изучен и налажен. Благодаря техническому прогрессу генераторы на основе ВИЭ могут составить ископаемым источникам энергии конкуренцию на рынке и стимулировать совершенствование различных технологий. Нефтяникам приходится разрабатывать более экологичные методы добычи нефти и утилизации попутных газов [11–13]. Наряду с этим ведутся работы в области повышения КПД ветро- и солнечных электрогенераторов.

Система слежения за Солнцем и ветровые нагрузки

Возможным решением для наиболее рационального использования солнечных модулей является применение систем слежения за Солнцем (ССС). СССР предназначены для сохранения перпендикулярности падения солнечных лучей на поверхность солнечных модулей в течение дня, что способствует максимальному сбору энергии. Невыполнение этого условия приводит к уменьшению эффективной площади и дополнительным отражениям. Коэффициент отражения растет при наклоне луча, так как меняется показатель преломления. Годовое изменение азимута и высоты над горизонтом для г. Челябинска (рис. 1, 2) происходит в широком диапазоне углов. Таким образом, статичные панели, находящиеся под оптимальным углом, обеспечивают максимум мощности лишь в полдень.

Произведем оценку увеличения вырабатываемой мощности при применении системы отслеживания.

Мощность СЭС в зависимости от отклонения падающих лучей от нормали:

$$W(i) = W_0 \cdot \cos(i), \quad (1)$$

где W_0 – номинальная мощность солнечной панели, при нулевом отклонении от перпендикуляра; i – угол отклонения от нормали.

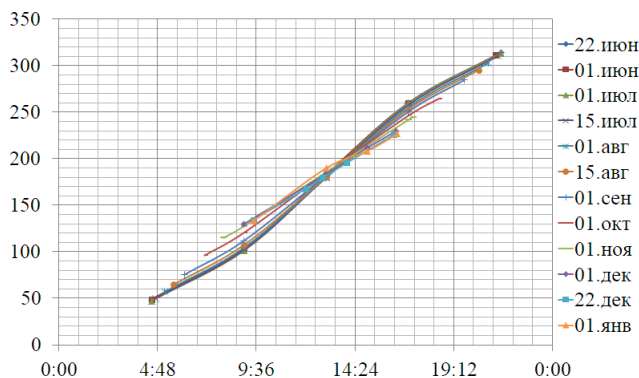


Рис. 1. Годовое изменение азимута

Дневное изменение азимута Солнца в среднем за год равняется 180 градусам. Рассчитаем суммарную выработку мощности в течение дня для неподвижных панелей:

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

Система с трекингом обеспечивает практически нулевое отклонение, следовательно, $i = 0$, тогда суммарная мощность равна

$$A_{\text{ориент}} = 2W_0 \int_0^{\pi/2} di = 2W_0 \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right) = \pi W_0. \quad (3)$$

Сравним полученные результаты:

$$\frac{A_{\text{ориент}}}{A_{\text{стат}}} = 1,57. \quad (4)$$

Таким образом, прирост в выработке при идеальных условиях составляет 57%. Учитывая затраты энергии на работу приводов и потери в цепи и при затенении в реальности, данный показатель будет ниже. Существующие исследования показывают прирост в производительности до 43% летом и 10–20% зимой [14–16]. Основное повышение производительности наблюдается в утренние и вечерние часы (рис. 3).

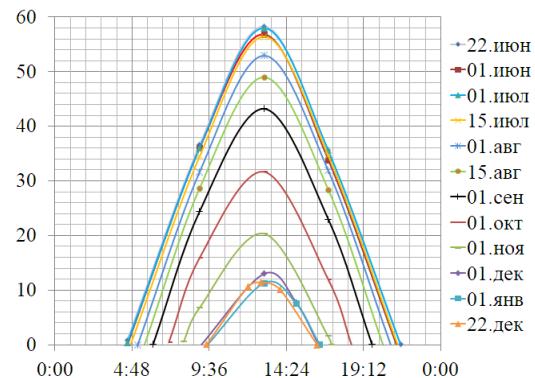


Рис. 2. Годовое изменение высоты над горизонтом

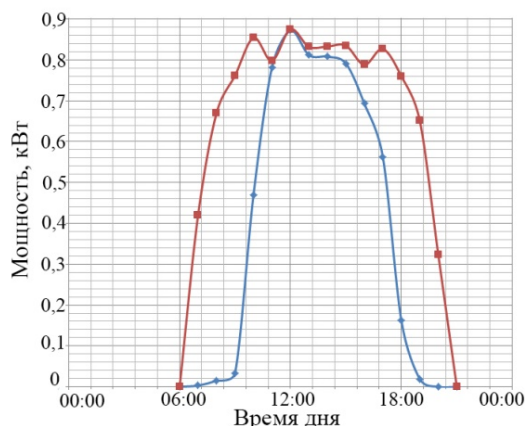


Рис. 3. Различия в производительности системы с трекингом (красный) и без него (синий)

Таблица 1

Нормативное значение ветрового давления, w_0

Ветровые районы России	Ia	I	II	III	IV	V	VI	VII
w_0 , кПа (кгс/м ²)	0,17 (17)	0,23 (23)	0,30 (30)	0,38 (38)	0,48 (48)	0,60 (60)	0,73 (73)	0,85 (85)

Таблица 2

Нормативные значения коэффициента k

Высота h , м	Коэффициент k для типов местности		
	A	B	C
≤ 5	0,75	0,5	0,4
10	1	0,65	0,4
20	1,25	0,85	0,55
40	1,5	1,1	0,8
60	1,7	1,3	1

Системы слежения за Солнцем были бы повсеместно распространены, если бы не следующие недостатки:

- Высокая цена. С каждым годом данные устройства становятся дешевле благодаря развитию multifunctional контроллеров с доступной ценой и технологий производства приводов.

- Большое занимаемое пространство. Так как панели находятся в движении, им необходима большая площадь, для того чтобы не соприкасаться с соседними трекерами и не затенять их.

- Высокая парусность. Парусность характеризует способность объекта улавливать кинетическую энергию потоков воздуха. Чтобы оценить силу, воздействующую на поверхность солнечных панелей, произведем расчеты ветровых нагрузок.

Ветровая нагрузка представлена двумя основными составляющими: средней и пульсационной. Согласно [17] при расчете сооружений высотой меньше 40 метров пульсационную часть нагрузки можно не учитывать.

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки w_m на высоте h от уровня земли определяют по формуле

$$w_m = w_0 \cdot k \cdot c, \quad (5)$$

где w_0 – нормативное значение давления ветра (табл. 1); k – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте; c – аэродинамический коэффициент.

Коэффициент k определяется по табл. 2 исходя от типа местности. Существуют следующие типы местности:

A – открытый берег моря, озера, водохранилища либо пустыня, степь, лесостепь и тундра;

B – территории небольших городов, леса и другие местности, равномерно покрытые препятствиями, высота которых не более 10 метров;

C – большие города с высотой зданий не менее 25 метров.

Для расчета был выбран тип местности *A* как обладающий самым сильным воздействием ветра.

Нормативное значение коэффициента k взято из табл. 2 для высоты установки менее 5 метров.

Аэродинамический коэффициент c для обособленных плоских сплошных конструкций, расположенных с наветренной стороны, принят равным 0,8.

В результате подстановки данных в формулу (5) было получено значение $w_m = 28,8$ кгс/м². Современные солнечные трекеры могут нести на себе солнечные панели с суммарной площадью до 10 м². Таким образом, ветровые нагрузки достигают значительных величин в районах с открытой местностью, а в случае штормов могут возрастать.

Известно множество случаев уничтожения солнечных электростанций ураганами и торнадо. Ураган Мария (2017) нанес огромный ущерб экономике Пуэрто-Рико, главным образом нарушив электрогенерацию и электроснабжение. Солнечная энергетика, одна из наиболее динамично развивающихся отраслей энергетики в этой стране, также пострадала от стихийного бедствия [18].

В США с 2000 года произошло множество сильных штормов и тропических циклонов [19]. Крупнейший экономический ущерб, нанесенный ураганом Катрина (2005), оценивается в 170 млрд долларов, ураган Harvey (2017) – 130 млрд долларов, ураган Мария (2017) – 93,6 млрд долларов.

Описание и принцип действия солнечного трекера с системой самораскрытия

Для сохранения солнечного трекера от критических повреждений можно прибегнуть к усилению конструкции или использованию особо прочных материалов, что приведет к значительному удорожанию установки. Другим выходом из ситуации может служить специальный тип солнечного трекера, способного получать информацию о приближающихся стихийных бедствиях от ближайших метеостанций либо от локального прибора и в случае штормовых предупреждений забла-

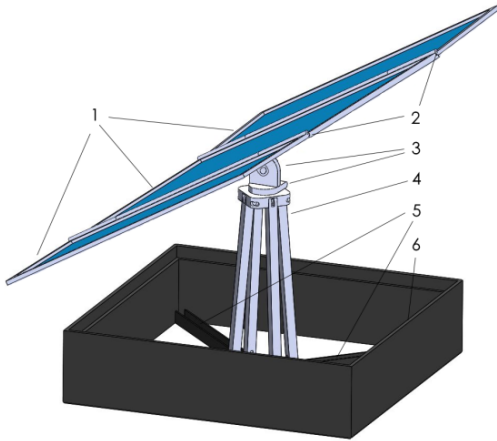


Рис. 4. Элементы солнечного трекера с системой самораскрытия

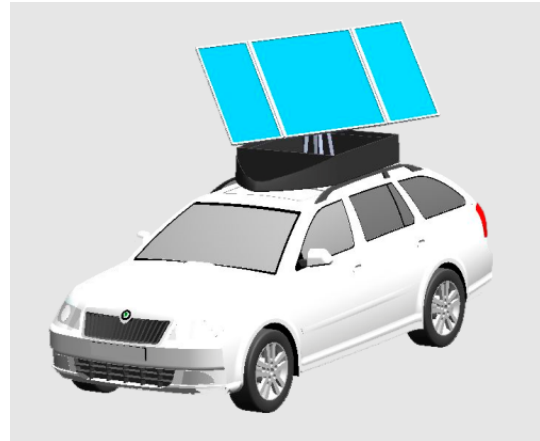


Рис. 5. Мобильный самораскрывающийся солнечный трекер

современно производить свертывание установки в защитный водонепроницаемый короб.

Система самораскрытия представляет собой комплекс приводов и направляющих, управляемых контроллером трекера. Рассмотрим принцип работы при помощи рис. 4.

Генерирующая электроэнергию поверхность состоит из центрального сегмента и двух створок из солнечных панелей с прорезиненными краями 1. В соединениях сегментов 2 расположены двигатели, производящие вращение боковых сегментов от 0 до 180 градусов. Приводы горизонтального и вертикального наведения 3 осуществляют слежение за Солнцем. Платформа и стойки 4 несут на себе вышеописанную конструкцию и имеют полости для проводки. Основания стоек 4 двигаются по направляющим 5 в сторону центра для раскрытия и в углы короба 6 – для свертывания установки.

Защитный короб 6 может иметь степень пыле- и влагозащиты для предотвращения повреждения электроники и механизмов во время наводнений либо песчаных бурь при использовании в пустынях. Для защиты внутренностей между платформой крепления стоек и внутренней стороной короба предполагается наличие брезента.

При соответствующем масштабировании установка приобретает свойство мобильности, что расширяет сферу ее использования, например в виде перевозимого на крыше багажника-генератора энергии (рис. 5), применяемого в дальних путешествиях для зарядки ноутбуков, телефонов или приготовления еды. Сравнение существующих мобильных солнечных электростанций произведено в [20].

Алгоритм слежения за Солнцем

Началом разработки нового типа солнечного трекера стало создание системы отслеживания Солнца. На данный момент существует множество алгоритмов определения азимута и высоты Солнца над горизонтом относительно времени, например, NREL Solar Position Algorithm (SPA) [21], алгоритм Миуса [22], дающие особо точные результаты, алгоритм Михальского с его простотой. Для упрощения внесения правок в алгоритм управления было решено разработать свой алгоритм.

При разработке программного обеспечения использовались следующие формулы [23, 24]. Моделирование, тестирование и отладка производилась в программе MATLAB Simulink. Рис. 6, 7, полученные как результат работы алгоритма, по-

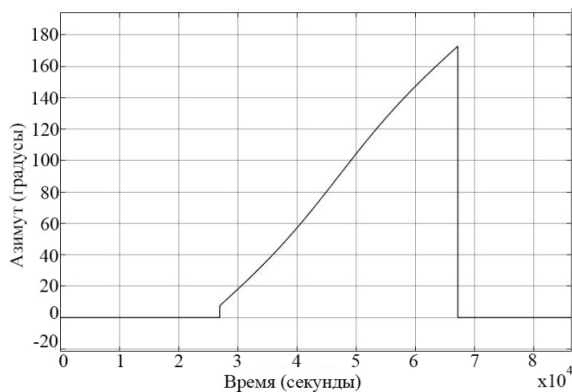


Рис. 6. Изменение азимута в течение дня

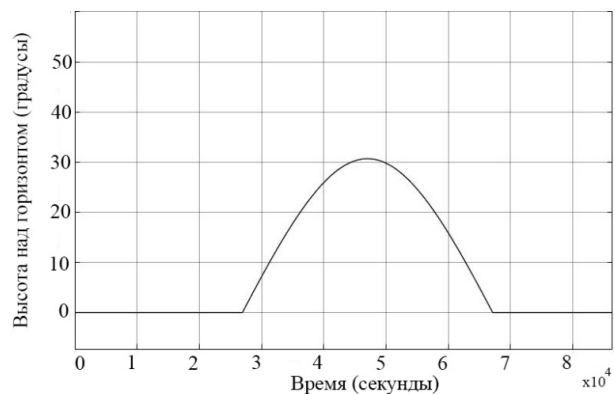


Рис. 7. Изменение высоты над горизонтом в течение дня

Сравнение разработанного алгоритма с NREL SPA

Время дня	Азимут, MATLAB	Азимут, SPA NREL	Высота над горизонтом, MATLAB	Высота над горизонтом, SPA NREL
0:00	357,1045	356,765	-73,297	-73,2515
1:00	39,738159	39,43301	-69,4865	-69,5051
2:00	64,53386	64,33693	-60,3003	-60,3494
3:00	79,246189	79,10498	-49,3378	-49,3977
4:00	89,902669	89,78784	-37,87	-37,9328
5:00	98,958457	98,85581	-26,3855	-26,4471
6:00	107,56919	107,4708	-15,1716	-15,2289
7:00	116,43613	116,3367	-4,48635	-4,53643
8:00	126,09957	125,9953	5,368834	5,456213
9:00	137,02554	136,9141	14,00197	14,03098
10:00	149,55647	149,438	20,90617	20,93553
11:00	163,72271	163,6013	25,49251	25,53712
12:00	179,00617	178,8901	27,23296	27,29927
13:00	194,36612	194,2642	25,8893	25,97916
14:00	208,72176	208,6389	21,64748	21,76089
15:00	221,47564	221,4115	15,01111	15,15243
16:00	232,5986	232,5498	6,572039	6,77706
17:00	242,40623	242,3688	-3,14832	-3,04452
18:00	251,35483	251,3252	-13,7436	-13,6368
19:00	259,9742	259,9488	-24,9024	-24,7938
20:00	268,936	268,9105	-36,3638	-36,2542
21:00	279,31052	279,2767	-47,8492	-47,7394
22:00	293,30146	293,2374	-58,9115	-58,8037
23:00	316,2846	316,1216	-68,4415	-68,3451

казывают изменение в азимуте и высоте Солнца над горизонтом в течение дня для г. Челябинска.

Результаты сравнения работы алгоритма с алгоритмом NREL SPA [25] без учета влияния погодных явлений сведены в табл. 3.

Высота над горизонтом и азимут, полученные из расчетов, соответствуют наблюдаемому положению Солнца в небе с достаточной точностью.

Заключение

Результатом работы стало начало разработки модифицированной модели солнечного трекера. Предполагается разработка нескольких типов подобных устройств.

- Укрепленный самораскрывающийся солнечный трекер будет полезен для солнечных электростанций, расположенных в регионах с высоким риском повреждения от стихийных бедствий.

- Монтируемая на крыше установка будет полезна владельцам загородных домов для обеспечения сохранности солнечных модулей во время долгого отсутствия.

- Мобильная версия устройства поможет путешественникам не испытывать ограничений в использовании электрического оборудования.

Главным недостатком предложенной установки является увеличенная стоимость из-за дополнительных затрат на систему самораскрытия и водонепроницаемый корпус.

Дальнейшие исследования будут направлены:

- на экономическое сравнение последствий от урона, обусловленного погодой, для разных конфигураций солнечных электростанций;
- расчет оптимальной прочности компонентов;
- расширенную проработку системы самораскрытия.

Данный материал подготовлен на базе проектного обучения в магистратуре Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), Российская Федерация, при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Соглашение РФФИ № 19-08-00070/19 от 29.12.2018 г.

Литература

1. U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark Q1 2017 / R. Fu, D. Feldman, R. Margolis et al. // *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. – 2017. – <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf> (accessed 16.04.2020). DOI: 10.2172/1395932
2. Google Environmental Report 2019 // Google LLC. – http://services.google.com/fh/files/misc/google_2019-environmental-report.pdf (accessed 16.04.2020).
3. 2019 Environmental Responsibility Report // Apple inc. – https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Responsibility_Report_2019.pdf (accessed 16.04.2020).
4. BP's Advancing Low Carbon accreditation programme // British Petroleum PLC. – 2018. – <https://www.bp.com/en/global/corporate/sustainability/climate-change/low-carbon-accreditation-programme.html> (accessed 16.04.2020).
5. Energetics future. Royal Dutch Shell. – <https://tinyurl.com/ydpx7mfb> (accessed 16.04.2020).
6. BP Statistical Review of World Energy. – British Petroleum PLC. – 68th – 2019. – P. 15. – <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-oil.pdf> (accessed 16.04.2020).
7. Pyper, J. DOE Officially Marks SunShot's \$1 per Watt Goal for Utility-Scale Solar / J. Pyper // *Green Tech Media*. – Sept. 12, 2017. – <https://www.greentechmedia.com/articles/read/doe-officially-hits-sunshot-1-per-watt-goal-for-utility-scale-solar#gs.37etfL> (accessed 16.04.2020).
8. Борисов, А. Стоимость солнечных электростанций упала на 30 процентов за год / А. Борисов // *Life*. – 2017. – https://life.ru/t/%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0/1043482/stoimost_solniechnykh_eliكتروstantsii_upala_na_30_protsientov_za_ghod (дата обращения: 16.04.2020).
9. BP Statistical Review of World Energy. – British Petroleum PLC, Carbon. – 68th. – 2019. – P. 57. – <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-co2-emissions.pdf> (accessed 16.04.2020).
10. An Arctic predator-prey system in flux: climate change impacts on coastal space use by polar bears and ringed seals / C.D. Hamilton, K.M. Kovacs, R.A. Ims et al. // *Journal of Animal Ecology*. – 2017. – Vol. 86, iss. 5. DOI: 10.1111/1365-2656.12685
11. Kutepova, E.A. Associated Gas Utilization in Russia: Issues and Prospects / E.A. Kutepova, A.Yu. Kni-zhnikov, K.V. Kochi. – Moscow: WWF-Russia-KPMG, 2011.
12. Tracking Fuel Supply. – IEA, Paris, 2019. – <https://www.iea.org/reports/tracking-fuel-supply-2019> (accessed 23.01.2020).
13. Tarasov, M.Yu. On the raising efficiency of associated petroleum gas utilization at the separation stages / M.Yu. Tarasov, E.A. Klevtsov, I.Z. Fakhretdinov // *Oil Industry Journal*. – 2018. – Vol. 18, iss. 03.
14. Результаты испытаний двусосного солнечного трекера / Д.А. Немков, А.В. Матвеев, С.Е. Щеклеин, Ю.Е. Немихин // *Конференция молодых ученых*. – 2016. – <http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/40569/1/tmuenin-2016-45.pdf> (дата обращения: 23.01.2020).
15. Aziz, S. On improving the Efficiency of a Solar Panel Tracking System / S. Aziz, S. Hassan // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 7.
16. Aziz, S. Energy and economic comparative study of a tracking vs. a fixed photovoltaic system in northern hemisphere / S. Aziz, S. Hassan // *International Journal of Energy, Environment and Economics*. – 2017.
17. Министерство строительства и ЖКХ РФ. Свод правил: Нагрузки и воздействия, 2016.
18. Kwasinski, A. Effects of Hurricane Maria on Renewable Energy Systems in Puerto Rico / A.Kwasinski // *7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. – 2018. – <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8566922> (accessed 23.01.2020). DOI: 10.1109/icrera.2018.8566922
19. U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: Table of Events // NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). – 2020. – <https://www.ncdc.noaa.gov/billions/events/US/2000-2019> (accessed 23.01.2020).
20. Особенности эксплуатации мобильных самораскрывающихся солнечных электростанций / Г.Н. Рякин, Е.В. Соломин, А.С. Мартыанов и др. // *Наука ЮУрГУ*. – 2019. – С. 240–248.
21. Reda, I. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications / I. Reda, A. Andreas // *NREL Report No. TP-560-34302*. – January 2008. – 55 p. – <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf> (accessed 20.01.2020). DOI: 10.2172/15003974
22. Meeus, J. *Astronomical Algorithms* / J. Meeus. – Willmann-Bell Inc., 1991.
23. Елистратов, В.В. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения / В.В. Елистратов, Е.С. Аронова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 164 с.
24. Черный, М.А. *Авиационная астрономия* / М.А. Черный. – М.: Транспорт, 1978.
25. The National Renewable Energy Laboratory // *SPA Calculator*. – <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/spa.html>. (accessed 20.01.2020).

Альтернативные источники энергии

Рявкин Глеб Николаевич, магистрант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; amdx3@bk.ru.

Соломин Евгений Викторович, д-р техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; solominev@susu.ac.ru.

Мадемлис Крестос, старший научный сотрудник кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Университет Аристотеля в Салониках, г. Салоники, Греция; mademlis@eng.auth.gr.

Ковалёв Антон Александрович, магистрант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; alpenglw305@yandex.ru.

Погорелов Богдан Тарасович, бакалавр, кафедра «Информационно-измерительная техника», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; boga-rap@mail.ru.

Юнусов Парвиз Алиевич, аспирант кафедры «Электрические станции», Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан; gamberro90@gmail.com.

Поступила в редакцию 6 октября 2020 г.

DOI: 10.14529/power210109

SOLAR TRACKER WITH A SELF-DEPLOYING SYSTEM

G.N. Ryavkin¹, amdx3@bk.ru,

E.V. Solomin¹, solominev@susu.ac.ru,

K. Mademlis^{1, 2}, mademlis@eng.auth.gr,

A.A. Kovalyov¹, alpenglw305@yandex.ru,

B.T. Pogorelov¹, boga-rap@mail.ru,

P.A. Yunusov³, gamberro90@gmail.com

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece,

³ Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article provides a brief overview of the state of solar energy in the world. Disadvantages of fossil energy sources are discussed. Low efficiency is considered the main disadvantage of renewable energy sources. A possible way to improve efficiency of solar modules through the use of solar tracking systems (STS) is analyzed. STS is a special device with two drives for horizontal and vertical guidance to ensure that solar modules face the highest light flux source and thereby increase generation of electricity using a special algorithm. The theoretical increase in production for systems under ideal conditions is calculated; working values thereof are given. The disadvantages of the considered type of renewable energy generators are listed. The calculation of wind loads on the STS was carried out according to the presented method. Examples of destruction of solar power plants by natural disasters are given. A new type of solar trackers with a self-deploying system is proposed; these can protect the installation from unfavorable weather conditions. We analyzed accuracy of the positioning algorithm developed for this device. The conclusion contains possible ways of using the installation, its disadvantages, as well as plans for future research.

Keywords: renewable energy, solar energy, solar tracker, natural disasters.

The present research was supported by Russian Foundation for Basic Research. Agreement RFBR #19-08-00070\19 of 29.12.2018.

References

1. Fu R., Feldman D., Margolis R., Woodhouse M., Ardani K. U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark Q1 2017. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, 2017. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf> (accessed 16.04.2020). DOI: 10.2172/1395932

2. Google Environmental Report 2019. *Google LLC*. Available at: http://services.google.com/fh/files/misc/google_2019-environmental-report.pdf (accessed 16.04.2020).

3. 2019 Environmental Responsibility Report. *Apple inc.* Available at: https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Responsibility_Report_2019.pdf (accessed 16.04.2020).

4. BP's Advancing Low Carbon accreditation programme. *British Petroleum PLC*, 2018. Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/sustainability/climate-change/low-carbon-accreditation-programme.html> (accessed 16.04.2020).

5. *Energetics future*. Royal Dutch Shell. Available at: <https://tinyurl.com/ydpx7mfb> (accessed 16.04.2020).
6. *BP Statistical Review of World Energy*. British Petroleum PLC, 68th, 2019, 15 p. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-oil.pdf> (accessed 16.04.2020).
7. Pyper J. DOE Officially Marks SunShot's \$1 per Watt Goal for Utility-Scale Solar. *Green Tech Media*. Sept. 12, 2017. Available at: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/doe-officially-hits-sunshot-1-per-watt-goal-for-utility-scale-solar#gs.37etfL> (accessed 16.04.2020).
8. Borisov A. [The cost of solar power plants fell by 30 percent per year]. *Life*, 2017. Available at: https://life.ru/t/%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0/1043482/stoimost_solniechnykh_eliektrostantsi_i_upala_na_30_protsientov_za_ghod (accessed 16.04.2020) (in Russ.)
9. *BP Statistical Review of World Energy*. British Petroleum PLC, Carbon, 68th, 2019, 57 p. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-co2-emissions.pdf> (accessed 16.04.2020)
10. Hamilton C.D., Kovacs K.M., Ims R.A., Aars J., Lydersen C. An Arctic predator-prey system in flux: climate change impacts on coastal space use by polar bears and ringed seals. *Journal of Animal Ecology*, 2017, vol. 86, iss. 5. DOI: 10.1111/1365-2656.12685
11. Kutepova E.A., Knizhnikov A.Yu., Kochi K.V. Associated Gas Utilization in Russia: Issues and Prospects. Moscow, WWF-Russia-KPMG Publ., 2011.
12. *Tracking Fuel Supply*, IEA, Paris, 2019. Available at: <https://www.iea.org/reports/tracking-fuel-supply-2019> (accessed 23.01.2020).
13. Tarasov M.Yu., Klevtsov E.A., Fakhretdinov I.Z. On the raising efficiency of associated petroleum gas utilization at the separation stages. *Oil Industry Journal*, 2018, vol. 18, iss. 03.
14. Nemkow D.A., Matveev A.V., Shcheklein S.E., Nemikhin Y.E. [Biaxial solar tracker test results]. *Conference of Young Scientists*, 2016. Available at: <http://elar.ufu.ru/bitstream/10995/40569/1/tmuenin-2016-45.pdf> (accessed 23.01.2020). (in Russ.)
15. Aziz S., Hassan S. On improving the Efficiency of a Solar Panel Tracking System. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 7.
16. Aziz S., Hassan S. Energy and economic comparative study of a tracking vs. a fixed photovoltaic system in northern hemisphere. *International Journal of Energy, Environment and Economics*, 2017.
17. *Ministerstvo stroitel'stva i ZhKKh RF. Svod pravil: Nagruzki i vozdeystviya* [Federal Agency for Construction and Housing and Communal Services of Russia. Building codes: loads and impacts], 2016.
18. Kwasinski A. Effects of Hurricane Maria on Renewable Energy Systems in Puerto Rico. *7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8566922> (accessed 23.01.2020). DOI: 10.1109/icrera.2018.8566922
19. U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: Table of Events. *NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI)*, 2020. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/billions/events/US/2000-2019> (accessed 23.01.2020).
20. Ryavkin G.N., Solomin E.V., Martyanov A.S., Ponomarev I.A., Shkred M.A. [Features of the operation of mobile self-deploying solar power plants]. *SUSU Science*, 2019, pp. 240–248. (in Russ.)
21. Reda I., Andreas A. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. *NREL Report No. TP-560-34302*, January 2008, 55 p. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf> (accessed 20.01.2020).
22. Meeus J. *Astronomical Algorithms*. Willmann-Bell Inc., 1991.
23. Elistratov V.V., Aronova E.S. *Solnechnyye energostanovki. Otsenka postupleniya solnechnogo izlucheniya* [Solar power plants. Estimation of Solar Income: A Training Manual]. St. Petersburg, Polytechnic University, 2012. 164p.
24. Chernyi M.A. *Aviatsionnaya astronomiya* [Aviation astronomy]. Moscow, Transport Publ., 1978.
25. The National Renewable Energy Laboratory. *SPA Calculator*. Available at: <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/spa.html> (accessed 20.01.2020).

Received 6 October 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Солнечный трекер с системой самораскрытия /
Г.Н. Рявкин, Е.В. Соломин, К. Мадемлис и др. //
Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. –
Т. 21, № 1. – С. 82–89. DOI: 10.14529/power210109

FOR CITATION

Ryavkin G.N., Solomin E.V., Mademlis K., Kovalyov A.A., Pogorelov B.T., Yunusov P.A. Solar Tracker with a Self-Deploying System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 82–89. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210109