

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ

SIMULATION OF PROCESSES AND MATERIALS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. Т. 25, № 2. С. 125—136.
DOI: 10.17073/1609-3577-2022-2-125-136

УДК 631; 621.315.592

Разработка мобильной автономной солнечной электростанции с использованием твердотельных гетеропереходных фотоэлементов для нужд аграрной промышленности

© 2022 г. С. Ж. Токмолдин^{1,2}, В. В. Клименов^{1,2}, Д. В. Гирин^{1,2}, Н. А. Чучвага^{1,2}✉,
К. П. Аймаганбетов^{1,2}, М. П. Кишкенебаев², С. Н. Тараканова², Н. С. Токмолдин^{1,2}

¹ ТОО «Научно–производственный центр агроинженерии»,
просп. Райымбека, д. 312, Алматы, 050005, Республика Казахстан

² Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева,
ул. Сатпаева, д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан

✉ Автор для переписки: nikolay.chuchvaga@gmail.com

Аннотация. Методом математического моделирования был проведен расчет распределения температуры в двусторонних солнечных элементах. Установлено, что различия в конфигурациях фотоэлектрического генератора заключаются лишь в том, что в двустороннем элементе больший отток тепла идет с тыльной стороны. При этом двусторонние солнечные элементы демонстрируют повышенную генерацию электрической энергии. Проведены расчеты, которые подтверждают обоснованность выбора в пользу двусторонних фотоэлектрических преобразователей, что актуально при использовании разработанной конфигурации фотоэлектрического генератора. На основе анализа имеющихся на рынке технологий фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в электричество, была разработана конфигурация фотоэлектрического генератора на основе двусторонних кремниевых солнечных панелей с гетеропереходом. Разработанная конфигурация представляет собой движущуюся платформу с установленной на ней фотоэлектрической системой, укомплектованной устройством сбора светового потока. Разработана двухосевая следящая система для общего случая плоского крепления солнечных модулей. Привод с диапазоном перемещения 350 мм установлен в направлении север–юг, а с диапазоном перемещения 450 мм — в направлении восток–запад. Задача заключалась в поиске нужного плеча для обеспечения симметричности и максимального угла поворота по оси. В результате были определены решения для направлений север–юг и восток–запад. Кроме того, на основе микроконтроллера была разработана принципиальная электрическая схема устройства, обеспечивающего заданный алгоритм управления солнечным трекером. Также в составе схемы имеется GPS/ГЛОНАСС модуль для получения точных координат местоположения установки и синхронизации времени.

Ключевые слова: СЭС, ИТ, аграрная промышленность, электрогенератор, фотовольтаика

Благодарность: Авторы благодарят Министерство образования и науки Республики Казахстан за финансирования проекта № AP09259279.

Для цитирования: Токмолдин С.Ж., Клименов В.В., Гирин Д.В., Чучвага Н.А., Аймаганбетов К.П., Кishкенебаев М.П., Тараканова С.Н., Токмолдин Н.С. Разработка мобильной автономной солнечной электростанции с использованием твердотельных гетеропереходных фотоэлементов для нужд аграрной промышленности. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2022; 25(2): 125—136. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-125-136>

Development of a mobile autonomous solar power plant for the needs of agriculture

S. Zh. Tokmoldin^{1,2}, V. V. Klimenov^{1,2}, D. V. Girin^{1,2}, N. A. Chuchvaga^{1,2,✉},
K. P. Aimaganbetov^{1,2}, M. P. Kishkenebaev², S. N. Tarakanova², N. S. Tokmoldin^{1,2}

¹ *Scientific Production Center of Agricultural Engineering, LTD,
312 Raiymbek Ave., Almaty 050005, Republic of Kazakhstan*

² *Satbayev University,
22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan*

✉ Corresponding author: nikolay.chuchvaga@gmail.com

Abstract. The method of mathematical modeling was used to calculate the temperature distribution in bifacial solar cells. It has been established that the differences in the configurations of the photovoltaic generator lie only in the fact that in a double-sided element, a greater outflow of heat comes from the back side. At the same time, bifacial solar cells demonstrate increased generation of electrical energy. The calculations performed confirm the validity of the choice in favor of two-sided solar cells, which is important when using the developed configuration of a photovoltaic generator. Based on the analysis of the technologies available on the market for photovoltaic conversion of solar energy into electricity, a configuration of a photovoltaic generator based on bifacial heterojunction silicon solar panels was developed. The developed configuration is a moving platform with a photovoltaic system installed on it, equipped with a light flux collection system.

A 2-axis servo system has been developed for the general case of flat mounting of solar modules. The drive with a travel range of 350 mm is installed in the north-south direction, 450 mm — east-west. The task was to find the right shoulder to ensure symmetry and the maximum angle of rotation along the axis. As a result, solutions were determined for the north-south and east-west directions.

In addition, on the basis of a microcontroller, a circuit diagram of a device was developed that provides a given control algorithm for a solar tracker. Also, the scheme includes a GPS/GLONASS module to obtain the exact coordinates of the installation location and time synchronization.

Keywords: SES, HIT, agrarian industry, electric generator, photovoltaic

Acknowledgments: The Authors are grateful to the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan for project funding, No. AP09259279.

For citation: Tokmoldin S.Zh., Klimenov V.V., Girin D.V., Chuchvaga N.A., Aimaganbetov K.P., Kishkenebaev M.P., Tarakanova S.N., Tokmoldin N.S. Development of a mobile autonomous solar power plant for the needs of agriculture. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(2): 125—136. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-125-136>

Введение

Интеграция энергетики и земли усиливается как в развитых, так и в развивающихся странах. Социальные проблемы, такие как последствия изменения климата, необходимость увеличения чистой энергии и сокращения выбросов, а также быстрый рост населения и экономики вызвали дополнительные потребности в продуктах питания, воде и энергии. Общий рост возобновляемых источников энергии (ветер, солнце, геотермальная энергия, энергия биомассы, гидроэнергия) и их новый потенциал использования в сельском хозяйстве направлены на решение этих проблем. Глобальные соглашения, например, Парижское соглашение 2015 г., наряду с необходимостью перехода к низкоуглеродной экономике и сокращения глобальных выбросов CO₂, обусловили рост использования возобновляемых источников энергии. Эти источники заменяют или дополняют существующие источники энергии и питают ключевые секторы экономики в развивающихся странах. Так, в Индии мощность возобновляемых источников электроэнергии удвоится с 2016 по 2022 гг. [1, 2].

Фотогальваническая (PV) и ветровая энергия уже обеспечивают 90 % роста мощности в Индии за счет снижения затрат. Кроме того, возобновляемые источники энергии ежегодно демонстрируют рекордный рост в других странах как в Северном, так и в Южном полушариях (IEA 2017). В Иордании, например, согласно Плану национальной энергетической стратегии, доля возобновляемых источников энергии в общем объеме энергоснабжения достигает 28,4 %. Водный сектор является одним из основных потребителей энергии в Иордании: 15 % общего потребления энергии в стране используется для перекачки воды. Таким образом, сектор ориентирован на использование возобновляемых источников энергии и повышение энергоэффективности (Министерство водного хозяйства и ирригации, 2016а). Такие сектора, как сельское хозяйство и водоснабжение, выиграют от возобновляемых источников энергии, поскольку они могут заменить существующие источники энергии и сделать относительно дешевую энергию доступной для использования в различных целях в сельском хозяйстве: нагрев воды, водозабор, сушка урожая, измельчение зерна, отопление теплиц, освещение объектов и т. д. [1, 2].

Динамичный рост доли энергии фотоэлектрических систем в энергетическом балансе многих стран обусловлен такими их преимуществами, как отсутствие загрязнения окружающей среды и других вредных последствий для экологии. Кроме того, не создается шум, а солнечная энергия преобразуется непосредственно в электричество [3].

Развитие ресурсного потенциала за счет увеличения доли возобновляемой энергии и перехода к альтернативным источникам энергии — это одна из важнейших задач, стоящих перед Республикой Казахстан. В аграрном секторе республики числится порядка 222 тыс. крестьянских и фермерских хозяйств, 1659 производственных сельскохозяйственных кооперативов, 7709 хозяйственных товариществ различных форм и акционерных обществ.

Фермерские хозяйства, удаленные от центральных коммуникаций, испытывают дефицит электроэнергии. Большое потребление энергии приходится на производственное и охранное освещение, бытовые электроприборы, электрооборудование для механизированных работ.

Развитие концентраторной солнечной энергетики началось еще в 70-х годах XX в. [4]. И сегодня концентраторные системы показывают одни из самых высоких КПД в фотоэнергетике [5]. Развитие концентраторных систем может позволить уменьшить потребность в полупроводниковых материалах [6]. То есть стоимость фотоэлементов становится менее значительна, так как она нивелируется эффективностью фотовольтаических преобразователей [7—9].

На основе анализа имеющихся на рынке технологий фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в электричество была разработана конфигурация фотоэлектрического генератора на базе двусторонних кремниевых солнечных панелей с гетеропереходом. Выбор этого класса солнечных панелей определяется анализом эффективности солнечных систем, проводимым группой под руководством М. Грина [10, 11]. Такие солнечные модули объединяют в себе преимущества как аморфного, так и кристаллического кремния для получения высокой эффективности преобразования солнечной энергии (~25 % на элементах) при использовании меньшего количества кремния и пониженных температур процесса изготовления, не превышающих 200—250 °C [12, 13]. Несмотря на то, что продукты на основе многопереходных фотоэлементов показывают рекордные результаты эффективности [14—17], они обладают достаточно большой ценой из-за сложности технологических процессов и дороговизны используемых материалов. Альтернативным вариантом для солнечных модулей, используемых в современных фотоэлектрических генераторах, могут служить солнечные модули на основе монокристаллов кремния (Si) или арсенида галлия (GaAs), а также тонких пленок (CIGS) [18—20]. Однако для фотовольтаики широкого потребления наиболее подходящей альтернативой по критерию «цена/качество» остаются фотоэлементы на основе кремния с гетеропереходом [21, 22].

Методика эксперимента и обсуждение результатов

Основной характеристикой, описывающей концентраторы солнечного излучения, является коэффициент концентрации, который определяется как отношение средней плотности сконцентрированного излучения к плотности потока света, падающего нормально на отражающую поверхность. Концентрирующая способность систем определяется геометрией концентратора и угловым радиусом солнечного диска, а также отражательной способностью зеркальной поверхности. Высокопотенциальные системы концентрации обычно имеют конфигурацию, близкую к форме поверхностей вращения второго порядка — параболоида, эллипсоида, гиперboloида или полусферы. В этом

случае может быть достигнута плотность энергии излучения, многократно превышающая солнечную постоянную [23].

Разработанная нашей командой конфигурация представляет собой движущуюся платформу с установленной на ней фотоэлектрической системой, укомплектованной системой сбора светового потока. С целью разработки оптимальной конфигурации фотоэлектрического генератора рассматривали различные технологии изготовления представленных на рынке солнечных элементов и сборки солнечных модулей, включая кремниевые диффузионные и кремниевые солнечные элементы с гетеропереходом, односторонние и двусторонние солнечные модули. На основе анализа современного уровня фотоэлектрической промышленности наиболее перспективной с точки зрения эффектив-

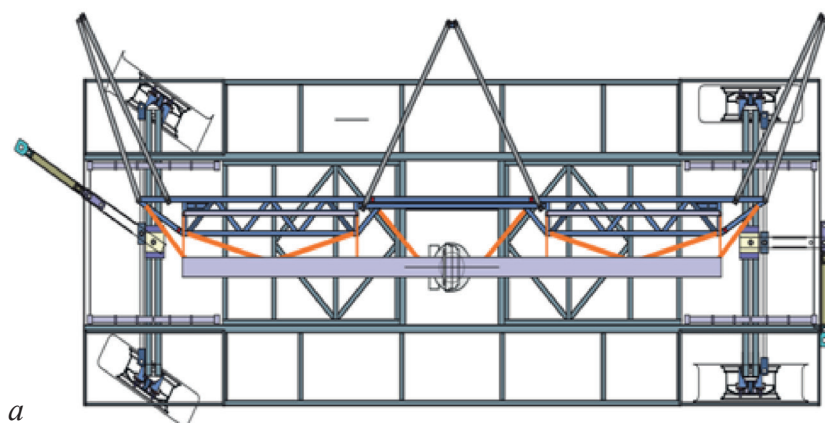
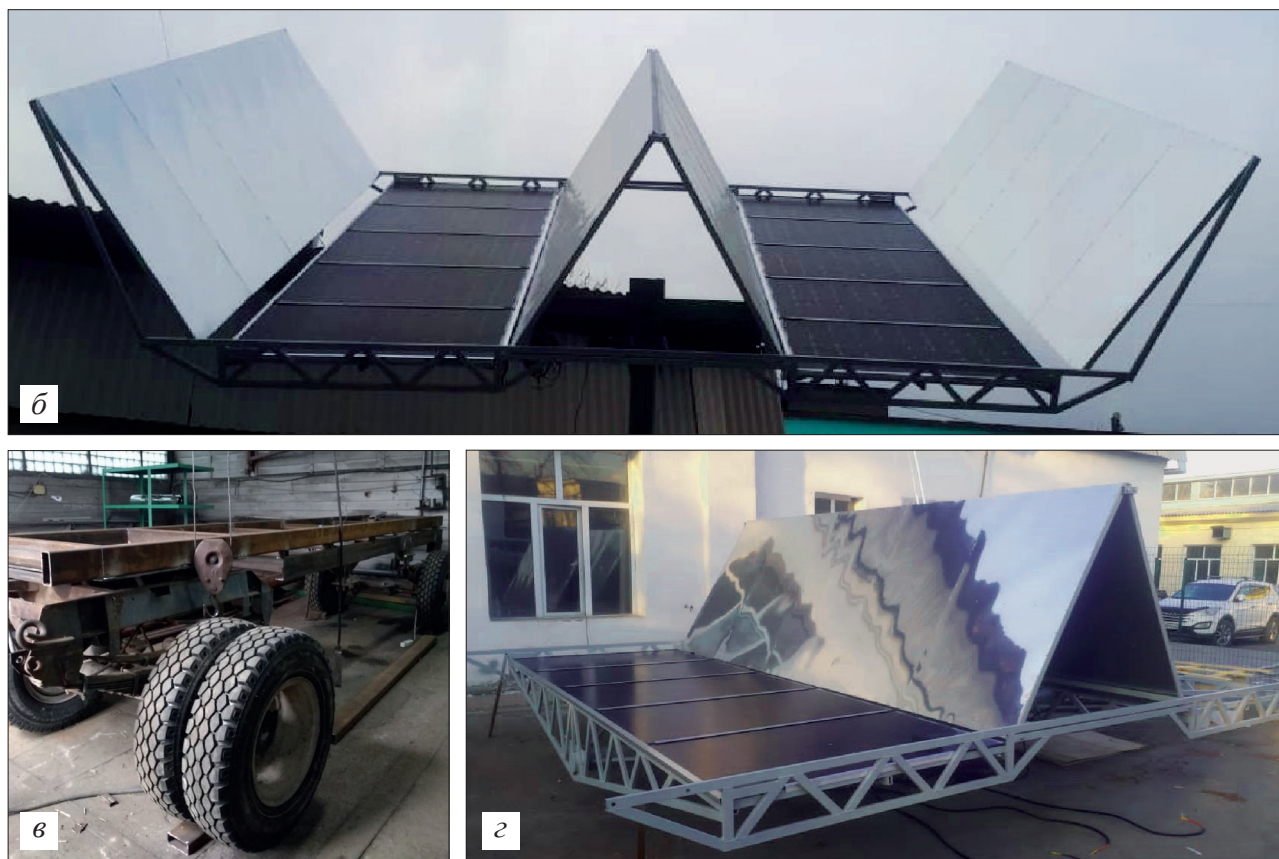


Рис. 1. Конфигурация светособирающей системы мобильного фотоэлектрического генератора на основе современных солнечных панелей: а — общий схематический вид; б — фотоэлектрический генератор в развернутом виде; в, г — этапы сборки конструкции

Fig. 1. Configuration of light-collecting system for mobile photovoltaic converter on the basis of advanced solar cells: (a) general appearance, (b) photoelectric converter in expanded condition, (b, r) system assembly steps



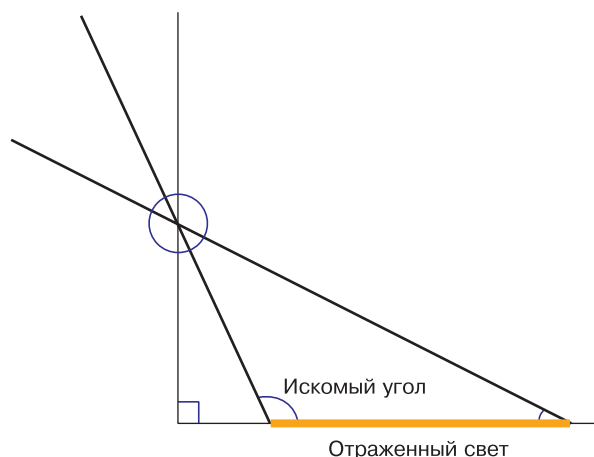


Рис. 2. Геометрическая интерпретация задачи
Fig. 2. Geometrical interpretation of problem

ности преобразования энергии, простоты технологического процесса и выработки электроэнергии в реальных условиях является комбинация кремниевых солнечных гетеропереходных элементов и двусторонних солнечных модулей.

Для создания высокоэффективной солнечной электростанции была разработана несущая конструкция, позволяющая монтировать 10 фотоэлектрических панелей размером $1670 \times 1000 \text{ мм}^2$, а также 20 светоотражающих поверхностей из анодированного алюминия с коэффициентом отражения более 0,94, для увеличения количества солнечного света, падающего на фотоэлектрические панели. Разработанная электростанция также оснащена силовыми шаговыми сервоприводами, вращающими светособирающую систему вокруг горизонтальной и вертикальной осей, для постоянного перпендикулярного положения относительно солнца с целью выработки максимально возможного количества энергии.

Одним из важнейших модулей фотоэлектрического генератора является концентраторная светособирающая система. Светособирающая система (рис. 1) представляет собой систему зеркал, расположенных под оптимальным углом к направлению светового потока и отражающих солнечное излучение на солнечную панель, смонтированную перпендикулярно к исходному световому потоку. В такой конфигурации правильный выбор оптимального отражающего материала позволяет избавиться от инфракрасной части солнечного спектра, приводящей, в основном, к нагреву рабочей поверхности модуля. Светособирающая система представляет собой конструкцию из прямоугольного профиля размером $40 \times 20 \times 2 \text{ мм}^3$. Размеры светособирающей системы составляют $1120 \times 2100 \times 1700 \text{ мм}^3$.

Одной из задач работы является расчет оптимальных углов, под которыми будут установлены отражающие покрытия относительно солнечной панели. Для того, чтобы посчитать оптимальный

угол расположения отражающих поверхностей (зеркал), необходимо найти количество света, попадающее на солнечную панель от каждого зеркала в зависимости от искомого угла. Для решения поставленной задачи начальные условия были выбраны таким образом, что задача превратилась в геометрическую, где нужно найти сторону треугольника (рис. 2). В данной задаче длины зеркал и длина модуля равны между собой.

Расчеты показали, что искомая сторона треугольника выражается следующей функцией:

$$y^2(\text{tg}^2(a) - 1 + 2y \cos(a) - 1 = 0, \quad (1)$$

где y — функция, описывающая отраженный свет; a — угол наклона зеркала к солнечному модулю.

Откуда по теореме Виета можно найти решения и построить график функции. Найти решения уравнения можно из системы

$$\begin{cases} y_1 + y_2 = -\frac{2\cos(a)}{\text{tg}^2(a) - 1}, \\ y_1 y_2 = \frac{1}{1 - \text{tg}^2(a)}. \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{-1 + 2\sin^2(a)} \times \\ &\times \left[\frac{\cos^3(a) \mp \sqrt{\cos^6(a) + 3\sin^3(a) - 1 - 2\sin^4(a)}}{-1 + 2\sin^2(a)} - \right. \\ &\left. - \frac{2\sin^2(a) \left(\cos^3(a) \mp \sqrt{\cos^6(a) + 3\sin^3(a) - 1 - 2\sin^4(a)} \right)}{-1 + 2\sin^2(a)} \right] + \\ &+ \frac{2\cos(a)\sin^2(a) - 2\cos(a)}{-1 + 2\sin^2(a)}; \\ y_2 &= \frac{\cos^3(a) \mp \sqrt{\cos^6(a) + 3\sin^3(a) - 1 - 2\sin^4(a)}}{-1 + 2\sin^2(a)}. \end{aligned}$$

Графическое решение имеет вид, представленный на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что решения представляют собой серию кривых подобных форм. Нас интересует область от 0 до π (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что значение функции уходит в бесконечность при угле a в 0,785 рад, что соответствует 45° . То есть свет отражается с обратной стороны треугольника параллельно искомой стороне, но в реальности мы такой случай не рассматриваем. Но так как нас интересуют угол наклона зеркала от 90° и выше, то мы будем рассматривать случай в диапазоне от 90 до 180° . Из решений уравнения (1) и графиков (см. рис. 3 и 4) видно, что y_1 уже вклю-

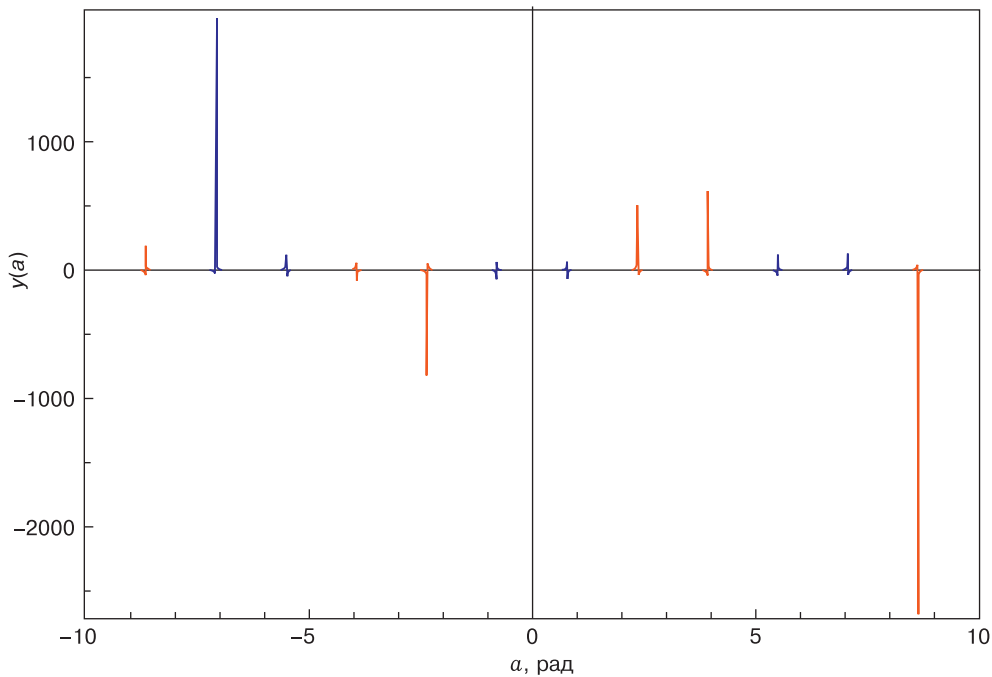
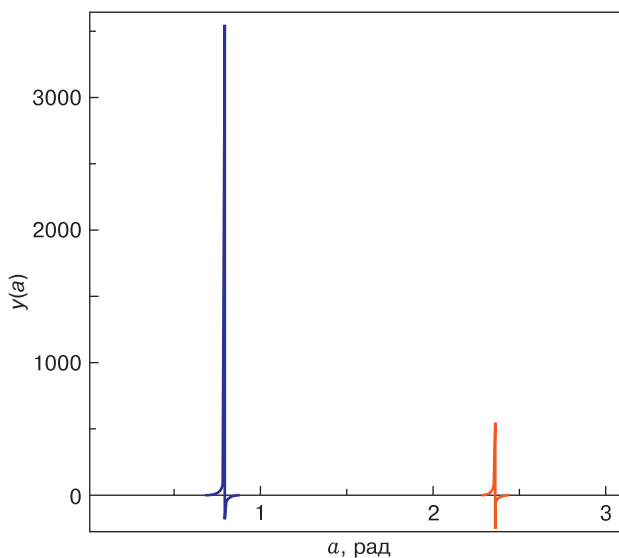


Рис. 3. Графическое решение уравнения (1)

Fig. 3. Graphical solution of Eq. (1)

Рис. 4. Графическое решение уравнения (1) на промежутке от 0 до π Fig. 4. Graphical solution of Eq. (1) for the range of 0 to π

чае в себя решения y_2 , но y_2 — это решения на рассматриваемой нами области. Поэтому само решение сводится к рассмотрению функции y_2 :

$$y_2 = \frac{\cos^3(a) - \sqrt{\cos^6(a) + 3\sin^3(a) - 1 - 2\sin^4(a)}}{-1 + 2\sin^2(a)}. \quad (3)$$

Из рис. 5 видно, что значение функции начинает увеличиваться от значения угла 90° и при значении угла в 2,355 рад, т. е. в 135° уходит в бесконечность. Часть графика (см. рис. 5), расположенная ниже оси абсцисс, показывает, что при угле больше 135° сторона треугольника, соответствующая отраженным лучам света, пересекается с основанием треугольника слева. Этот случай мы также

не рассматриваем, так как реально свет отражается лишь в одну сторону — вправо (см. рис. 2). Поэтому определим область искомых значений угла от 90° до 135° и функции от 0.

Край пятна отраженного света от края зеркала, расположенного ближе к солнечному модулю, будет менять положение в геометрическом пространстве медленнее, чем край пятна, отраженный от дальней точки стороны зеркала. Поэтому скорость уменьшения засвеченной области будет определяться именно тем, с какой скоростью будет изменяться положение пятна, отраженного от дальней точки стороны зеркала. Следовательно, скорость уменьшения засвеченной области будет совпадать со скоростью роста функции от 0 до 1.

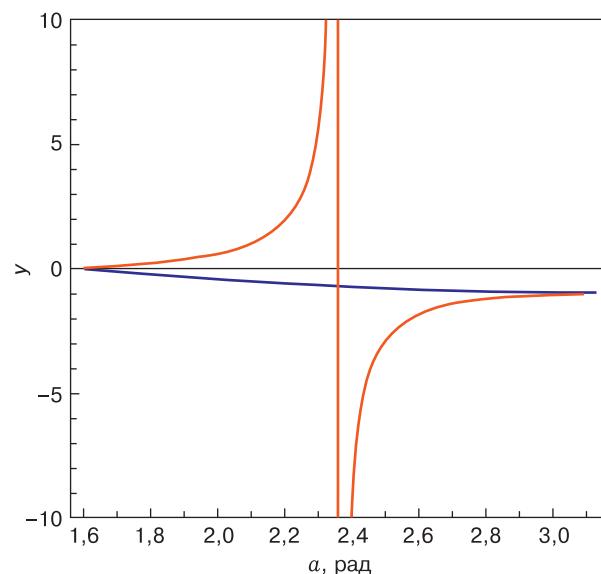


Рис. 5. Графическое решение уравнения (3)

Fig. 5. Graphical solution of Eq. (3)

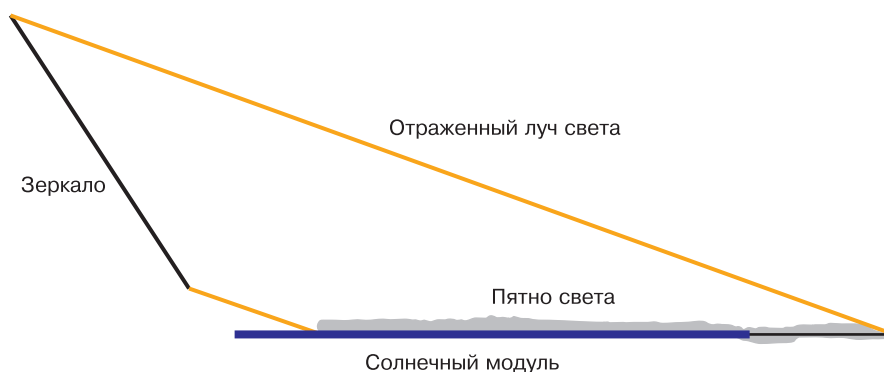


Рис. 6. Ход отраженных лучей от зеркала, относительно солнечного модуля
Fig. 6. Reflected light beam path from mirror relative to solar cell module

Ввиду симметричности функции искомое выражение будет удовлетворять функции

$$f(a) = -y_2(a - (2,093 - 1,57)) + 10.$$

Поэтому искомая функция будет иметь вид $y(a) + f(a)$ (рис. 7).

Решение на рис. 7 приведено для случая с двумя симметричными зеркалами. Искомый оптимальный угол составляет 2,093 рад, что соответствует 120° . Как видно из рис. 7, увеличение количества отраженного света начинается с положения угла более чем 90° и продолжается до 120° . Затем начинается уменьшение количества отраженного света на солнечной панели.

Были выбраны фотоэлектрические панели SW PREMIUM PLUS HJT 310 — двусторонние солнечные модули, способные при нормальных условиях вырабатывать до 310 Вт электрической энергии (работа была сделана в 2019–2020 годах, на сегодняшний день, возможно мы бы рассматривали панели от 400 Вт). Так как планировалось использование двусторонних панелей, расчетная выработка одной панели могла вырасти до 403 Вт, для случая 30 % альбедо. А также до 582 Вт, исходя из расчетных данных, с учетом светособирающей системы (без учета альбедо). При установке 10 панелей общая мощность электростанции могла достигать 5,8 кВт (6,7 кВт с учетом альбедо). Поэтому для такой конфигурации достаточно использовать инвертор, способный преобразовывать 7 кВт электрической энергии.

Помимо высокой мощности электростанции, проблемы в подборе инвертора добавляли выходные характеристики панелей:

- V_{mpp} (максимальное выходное рабочее напряжение) — 36,1 В;
- I_{mpp} (максимальный выходной рабочий ток), который при условии двойной засветки мог возрасти до 8,6—17,2 А.

Естественно, при соединении 10 панелей последовательно рабочее напряжение инвертора

должно достигать 361 В (без учета альбедо). При мощности в 7 кВт на рынке присутствуют модели только дорогостоящих инверторов западных компаний, например SMA. Кроме того, такие инверторы, как правило, бывают или прямого подключения к сети, или только к накопительным батареям. Проект планировался как полностью автономная электростанция с возможностью одновременно прямой подачи переменного напряжения в сеть и работы с аккумуляторными батареями, поэтому характеристики таких инверторов нам не подошли, да и стоимость данных инверторов начиналась бы от 12 тыс. долл. США. С учетом параметров разрабатываемой установки были рассмотрены несколько вариантов соединения панелей (ниже приведены расчеты без учета альбедо):

- 2 параллельных стринга по 5 панелей, напряжение до 181 В, ток до 34,4 А;
- 3 параллельных стринга по 3 панели (один модуль в запасе), напряжение до 108,5 В, ток до 51,6 А, максимальная мощность электростанции падает до 5,26 кВт.

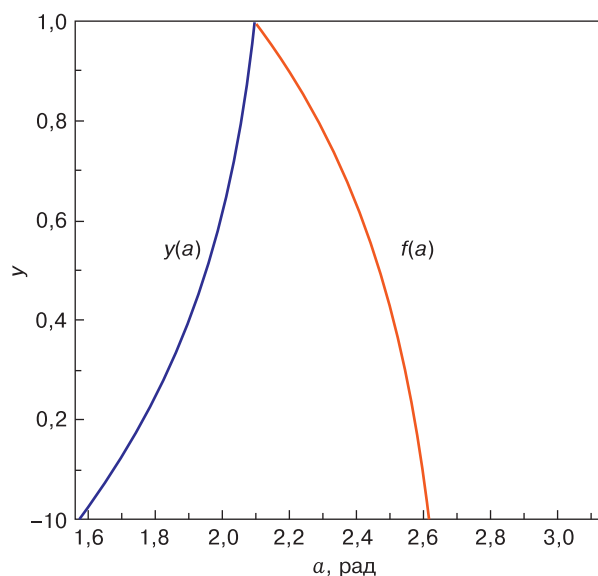


Рис. 7. График искомой функции
Fig. 7. Graph of sought function

Ассиметричные способы подключения (например, 2 параллельных стринга по 4 и 6 панелей, соответственно) применяются на практике, однако, в основном, для их применения используется или инвертор с двумя отдельными контактами, или 2 инвертора.

После исследования рынка выбор был сделан в пользу инвертора MUST Power PV3500 PRO 8K с возможностью одновременной работы напрямую с сетью переменного тока и аккумуляторными батареями. Максимальное входное напряжение от фотоэлектрических модулей составляет 145 В, а ток — до 100 А. Таким образом, была выбрана следующая схема подключения: 3 параллельных стринга по 3 панели, с одной запасной панелью.

Для тестирования фотоэлектрических панелей был разработан, собран и запущен светодиодный солнечный имитатор. Особенностью конструкции имитатора, является возможность тестирования как стандартных фотоэлектрических панелей, так и двусторонних модулей.

Требование к разрабатываемой системе — получение точных результатов измерений при различных условиях засветки. Каретка, на которую установлен прототип фотоэлектрического генератора, может передвигаться внутри каркаса имитатора. Это позволяет снимать характеристики модулей или системы как при интенсивности излучения «1 Солнце», так и при большем или меньшем по отношению к ней уровнях излучения.

В качестве источника питания для испытания фотоэлектрического генератора используется прибор КЕРСО ВОР 50–20МГ с максимальной регулируемой мощностью до 1 кВт. Приборы серии КЕРКО ВОР — это программируемые устройства, выполняющие функции регулируемого источника питания и потребителя (нагрузки). Такие свойства источника питания и нагрузки позволяют моделировать испытания фотоэлектрических систем в действительных условиях среды. Такой подход позволяет измерять как эффективные электрические характеристики фотоэлектрических систем, так и характеристики, полученные в лабораторных условиях.

Для достижения наибольшей эффективности солнечной панели требуется правильный подбор сопротивления нагрузки. Для этого фотоэлектрические панели не подключают напрямую к нагрузке, а используют контроллер управления фотоэлектрическими системами, обеспечивающий оптимальный режим работы панелей.

Измерительная система в составе регулируемого источника питания и светодиодного имитатора дает возможность подбора необходимых условий и контроллеров для оптимальной работы фотоэлектрических панелей. Регулируемый источник питания позволяет не только получать

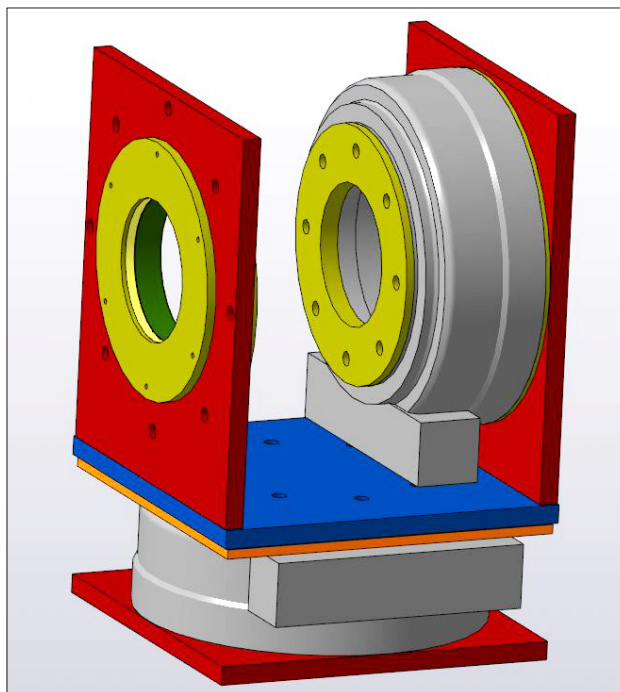


Рис. 8. Редуктор с шаговым двигателем SE9

Fig. 8. SE9 stepper motor drive

вольт-амперные характеристики испытываемых модулей, но и создавать экстремальные условия работы путем изменения нагрузок и возможностью создавать резкие скачки встречного напряжения, а светодиодный имитатор, дает возможность имитировать как низкую засветку модуля, так и превышающую интенсивность в «1 Солнце». Для обработки полученных данных используется ПО LabVIEW.

Для натурных испытаний фотоэлектрического генератора был проведен расчет ветровой нагрузки для изготавливаемых электрогенераторов. Выполняли следующие расчеты: сбор нагрузок, оценка частот собственных колебаний конструкции, стойки на прочность, приближенный расчет болтов-креплений стойки на прочность. Все расчеты были оформлены в виде скрипта формата «.xlsx». При расчете ветровой нагрузки, используя оформленный скрипт в формате «.xlsx», можно для качественного монтажа фотоэлектрического генератора, дать рекомендации фермерам по направлению системы относительно ветра и установки волнорезов. Эти расчеты в данной работе не приводятся, так как они сделаны по общеизвестным принятым методикам и научного интереса не представляют.

Соединительный кабель постоянного тока модулей и инвертора подбирался из расчета не более 4 А на 1 мм² сечения провода. Был выбран специальный кабель для наружного монтажа в стекловолоконной изоляции с сечением проводника 16 мм². При максимально возможной силе тока в 51,6 А, на 1 мм² сечения проводника приходилось бы

не более 3,23 А тока. В этом случае потеря напряжения на 100 м кабеля составила бы максимум 11 %, что считается отличным результатом при таких нагрузках.

При выборе емкости аккумуляторных батарей было применено лишь одно условие: суммарная емкость должна иметь возможность поддерживать автономность электростанции на протяжении 24 ч. Было решено подобрать емкость аккумуляторов из расчета потребления энергии целевым потребителем — фермером или чабаном. Всего было приобретено 8 гелиевых аккумуляторов MUST емкостью 250 А · ч каждый.

В качестве силовых сервоприводов выбор пал на редуктор с шаговым двигателем SE9 (рис. 8), крутящий момент которого достигает 6,5 кН · м, а момент стационарного удерживания 33,9 кН · м.

В конструкции генератора используется двухосевая следящая система для общего случая плоского крепления солнечных модулей. Привод с диапазоном перемещения 350 мм установлен в направлении север–юг, 450 мм — восток–запад. Задача заключалась в поиске нужного плеча для обеспечения симметричности и максимального угла поворота по оси. В результате были определены решения для направлений север–юг и восток–запад.

Кроме того, применяется принципиальная электрическая схема устройства, обеспечивающего заданный алгоритм управления солнечным трекером. Также, в составе схемы имеется GPS/ГЛОНАСС модуль для получения точных координат местоположения установки и синхронизации времени.

Заключение

Разработана и изготовлена конструкция, которая представляет собой систему зеркал, расположенных под оптимальным углом к направлению светового потока и отражающих солнечное излучение на солнечную панель, которая установлена перпендикулярно к исходному световому потоку. Математическим методом найден оптимальный угол наклона отражающей поверхности для предложенной схемы светособирающей концентраторной системы. Искомый оптимальный угол составил 2,093 рад, что соответствует 120°. Затем начинает-

ся уменьшение количества отраженного света на солнечной панели.

Создана двухосевая следящая система для общего случая плоского крепления солнечных модулей. Привод с диапазоном перемещения 350 мм установлен в направлении север–юг, 450 мм — восток–запад. Задача заключалась в поиске нужного плеча для обеспечения симметричности и максимального угла поворота по оси. В результате были определены решения для направлений север–юг и восток–запад.

На основе микроконтроллера разработана принципиальная электрическая схема устройства, обеспечивающего заданный алгоритм управления солнечным трекером. В составе схемы имеется GPS/ГЛОНАСС модуль для получения точных координат местоположения установки и синхронизации времени.

Другим вариантом, который сейчас реализуется нашей группой, является стационарная мобильная электростанция. Мобильная электростанция на основе солнечной энергии позволяет оперативно перемещать при передислокациях отары внутри секторов огороженных пастбищ. Будет полностью укомплектована и готова к эксплуатации. Конструкция трансформируемая, комплекты универсальны, легко и быстро устанавливаются там, где необходимо. Электрические компоненты электростанции готовы к работе, находятся в собранном виде. Аккумуляторные батареи (АБ) и блок управления (контроллер заряда и напряжения) интегрированы в контейнер, все розетки удобно расположены на его передней панели. В рабочую конфигурацию выходного контура входит бензиновый генератор, который включается в исключительных случаях. Мощность фотоэлектрических преобразователей станции будут обоснованы, исходя от нагрузки. От электростанции будут работать приводы водоподъемных насосов, системы видеонаблюдения, электроосвещение, механические устройства — измельчители, кормодробилки и др. Все электрооборудование будет смонтировано в защищенном всепогодном контейнере, сами солнечные батареи будут расположены над контейнером. Новизной такой работы является, то, что впервые в Казахстане будут применены элементы «умного дома» для нужд аграрной промышленности.

Библиографический список

1. Энергетика Иордании. EES EAEC. Мировая энергетика. <https://www.eeseaec.org/energetika-stranmira/energetika-iordanii> (дата обращения: 17.05.2022).
2. Al-Saidi M., Lahham N. Solar energy farming as a development innovation for vulnerable water basins. *Development in Practice*. 2019; 29(5): 619—634. <https://doi.org/10.1080/09614524.2019.1600659>
3. Majewski J., Szymanek M. Technical, economic and legal conditions of the development of photovoltaic generation in Poland. *Acta Energetica*. 2012; 2(11): 21—26.
4. Swanson R.M. The promise of concentrators. *Progress in Photovoltaics: Research and Application*. 2000; 8(1): 93—104. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-159x\(200001/02\)8:13.0.co](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-159x(200001/02)8:13.0.co)

5. Photovoltaic device performance calibration services. <https://pvdpc.nrel.gov/> (дата обращения: 22.08.2019).
6. Андреев В.М. Концентраторная солнечная фото-энергетика. Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2012; (5–6): 40—44.
7. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фото-энергетики. *Физика и техника полупроводников*. 2004; 38(8): 937—948.
8. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rummyantsev V.D. Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. John Wiley & Sons Ltd; 1997. 312 p.
9. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Rummyantsev V.D., Paleeva E.V., Shvarts M.Z., Algora C. Technical digest of the international PVSEC-11. *Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting*. Japan, Sapporo. July 7–9, 1999. 147 p.
10. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D. Solar cell efficiency tables (version 42). *Progress in Photovoltaics*. 2013; 21(5): 827—837. <https://doi.org/10.1002/pip.2404>
11. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D. Solar cell efficiency tables (version 43). *Progress in Photovoltaics*. 2014; 22(1): 1—9. <https://doi.org/10.1002/pip.2452>
12. Sawada T., Terada N., Tsuge S., Baba T., Takahama T., Wakisaka K., Tsuda S., Nakano S. High-efficiency a-Si/c-Si heterojunction solar cell. *Proc. of 1994 IEEE 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion – WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*. Waikoloa, HI, USA. 5–9 Dec., 1994. USA: IEEE; 1994: 1219—1226. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.519952>
13. Yamamoto K. 25.1% efficiency Cu metallized heterojunction crystalline Si solar cell. *25th Int. Photovoltaic Sc. and Eng. Conf.* Busan, Korea. November, 2015.
14. Dimroth F., Tibbits T., Niemeyer M., Predan F., Beutel P., Karcher C., Oliva E., Siefer G., Lackner D., Fus-Kailuweit P., Bett A., Krause R., Drazek C., Guiot E., Wasselin J., Tauzin A., Signamarcheix T. Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2016; 6(1): 343—349. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2501729>
15. Geisz J.F., Steiner M.A., Jain N., Schulte K., France R., McMahon W., Perl E., Friedman D. Building a six-junction inverted metamorphic concentrator solar cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2018; 8(2): 626—632. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2778567>
16. Dimroth F., Tibbits T., Niemeyer M., et al. Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2016; 6(1): 343—349. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7356148>
17. Sharp develops concentrator solar cell with world's highest conversion efficiency of 43.5%: Achieved with concentrator triple-junction compound solar cell. Press release Sharp Corporation. May 31, 2012. <http://sharp-world.com/corporate/news/120531.html>
18. Slade A., Garboushian V. 27.6% efficient silicon concentrator cell for mass production. *Techn. Digest. 15th Inter. Photovoltaic Sc. and Eng. Conf.* Beijing, October 11–13, 2005; 701 p. https://www.researchgate.net/publication/267779112_276_Efficient_Silicon_Concentrator_Solar_Cells_for_Mass_Production
19. Ward J.S., Ramanathan K., Hasoon F.S., Coutts T.J., Keane J., Contreras M.A., Moriarty T., Noufi R.A. 21.5% efficient Cu (In,Ga) Se₂ thin-film concentrator solar cell. *Progress in Photovoltaics Research and Application*. 2002; 10(1): 41—46. <https://doi.org/10.1002/pip.424>
20. Chiang C.J., Richards E.H. A twenty percent efficient photovoltaic concentrator module. *Proc. IEEE Conf. on Photovoltaic Specialists*. Kissimmee, FL, USA. 21–25 May, 1990. IEEE; 1990: 861—863. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1990.111743>
21. Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W., Irie T., Konishi K., Nakano K., Uto T., Adachi D., Kanematsu M., Uzu H., Yamamoto K. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nature Energy*. 2017; 2(5): 17032. <https://doi.org/10.1038/NENERGY.2017.32>
22. Токмолдин Н.С., Чучвага Н.А., Вербицкий В.Н., Териуков Е.И., Титов А.С., Токмолдин С.Ж., Жолдыбаев К.С. Использование солнечных элементов с двусторонней контактной сеткой в условиях Казахстана. *Журнал технической физики*. 2017; 87(12): 1879—1883. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.12.45213.2274>
23. López A.L., Andreev V.M. (eds.). Silicon concentrator solar cells. In: *Concentrator photovoltaics*. Vol. 130. Springer series in optical sciences. Heidelberg, Berlin: Springer; 2007: 51—66. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68798-6_3

References

1. Energy Jordan. EES EAEC. World Energy. <https://www.eeseaec.org/energetika-stran-mira/energetika-ioridanii> (accessed on 17.05.2022).
2. Al-Saidi M., Lahham N. Solar energy farming as a development innovation for vulnerable water basins. *Development in Practice*. 2019; 29(5): 619—634. <https://doi.org/10.1080/09614524.2019.1600659>
3. Majewski J., Szymanek M. Technical, economic and legal conditions of the development of photovoltaic generation in Poland. *Acta Energetica*. 2012; 2(11): 21—26.
4. Swanson R.M. The promise of concentrators. *Progress in Photovoltaics: Research and Application*. 2000; 8(1): 93—104. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-159x\(200001/02\)8:13.0.co](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-159x(200001/02)8:13.0.co)
5. Photovoltaic device performance calibration services. <https://pvdpc.nrel.gov/> (accessed on 22.08.2019).
6. Andreev V.M. Concentrator solar photovoltaics. *Alternativnaâ energetika i èkologîâ = Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2012; (5–6): 40—44. (In Russ.)
7. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rummyantsev V.D. Solar photovoltaics: trends and prospects. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and Technology of Semiconductors*. 2004; 38(8): 937—948. (In Russ.)
8. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rummyantsev V.D. Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. John Wiley & Sons Ltd; 1997. 312 p.
9. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Rummyantsev V.D., Paleeva E.V., Shvarts M.Z., Algora C. *Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting*. Japan, Sapporo. July 7–9, 1999. 147 p.
10. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D. Solar cell efficiency tables (version 42). *Progress in Photovoltaics*. 2013; 21(5): 827—837. <https://doi.org/10.1002/pip.2404>

11. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D. Solar cell efficiency tables (version 43). *Progress in Photovoltaics*. 2014; 22(1): 1—9. <https://doi.org/10.1002/pip.2452>
12. Sawada T., Terada N., Tsuge S., Baba T., Takahama T., Wakisaka K., Tsuda S., Nakano S. High-efficiency a-Si/c-Si heterojunction solar cell. *Proc. of 1994 IEEE 1st World Conf. on Photovoltaic En. Conversion – WCPEC (A Joint Conf. of PVSC, PVSEC and PSEC)*. Waikoloa, HI, USA. 5–9 Dec., 1994. USA: IEEE; 1994: 1219—1226. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.519952>
13. Yamamoto K. 25.1% efficiency Cu metallized heterojunction crystalline Si solar cell. *25th Int. Photovoltaic Sc. and Eng. Conf.* Busan, Korea. November, 2015.
14. Dimroth F., Tibbits T., Niemeyer M., Predan F., Beutel P., Karcher C., Oliva E., Siefert G., Lackner D., Fus-Kailuweit P., Bett A., Krause R., Drazek C., Guiot E., Wasselin J., Tauzin A., Signamarcheix T. Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2015; 6(1): 343—349. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7356148>
15. Geisz JF, Steiner MA, Jain N, Schulte K., France R., McMahon W., Perl E., Friedman D. Building a six-junction inverted metamorphic concentrator solar cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2018; 8(2): 626—632. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2778567>
16. Dimroth F, Tibbits TND, Niemeyer M, et al. Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. *IEEE J Photovolt.* January, 2016; 6(1): 343—349. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2501729>
17. Sharp develops concentrator solar cell with world's highest conversion efficiency of 43.5%: Achieved with concentrator triple-junction compound solar cell. Press release Sharp Corporation. May 31, 2012. <http://sharp-world.com/corporate/news/120531.html>
18. Slade A., Garboushian V. 27.6% efficient silicon concentrator cell for mass production. *Techn. Digest. 15th Inter. Photovoltaic Sc. and Eng. Conf.* Beijing, October 11–13; 2005. 701 p. https://www.researchgate.net/publication/267779112_276_Efficient_Silicon_Concentrator_Solar_Cells_for_Mass_Production
19. Ward J.S., Ramanathan K., Hasoon F.S., Coutts T.J., Keane J., Contreras M.A., Moriarty T., Noufi R.A. 21.5% efficient Cu (In,Ga) Se₂ thin-film concentrator solar cell. *Progress in Photovoltaics Research and Application*. 2002; 10(1): 41—46. <https://doi.org/10.1002/pip.424>
20. Chiang C.J., Richards E.H. A twenty percent efficient photovoltaic concentrator module. *Proc. IEEE Conf. on Photovoltaic Specialists*. Kissimmee, FL, USA. 21–25 May, 1990. IEEE: 861—863. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1990.111743>
21. Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W., Irie T., Konishi K., Nakano K., Uto T., Adachi D., Kanematsu M., Uzu H., Yamamoto K. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nature Energy*. 2017; 2(5): 17032. <https://doi.org/10.1038/NENERGY.2017.32>
22. Tokmoldin N.S., Chuchvaga N.A., Zholdybayev K.S., Terukov E.I., Tokmoldin S.Z., Verbitskii V.N., Titov A.S. The use of solar cells with a bifacial contact grid under the conditions of Kazakhstan. *Technical Physics*. 2017; 62(12): 1877—1881. <https://doi.org/10.1134/S106378421712026X>
23. López A.L., Andreev V.M. (eds.). Silicon concentrator solar cells. In: Concentrator photovoltaics. Vol. 130. Springer series in optical sciences. Heidelberg, Berlin: Springer; 2007: 51—66. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68798-6_3

Информация об авторах / Information about the authors

Токмолдин Серекбол Жарылгапович — доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник; ТОО «Научно-производственный центр агроинженерии», просп. Райымбека, д. 312, Алматы, 050005, Республика Казахстан; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ТОО «Физико-технический институт», ул. Сатпаева, д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0633-4733>; e-mail: stokmoldin@mail.ru

Клименов Василий Васильевич — главный технолог; ТОО «Научно-производственный центр агроинженерии», просп. Райымбека, д. 312, Алматы, 050005, Республика Казахстан; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ТОО «Физико-технический институт», ул. Сатпаева, д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6836-3033>; e-mail: vasyly_vasyly@mail.ru

Гирин Дмитрий Вадимович — младший научный сотрудник; ТОО «Научно-производственный центр агроинженерии», просп. Райымбека, д. 312, Алматы, 050005, Республика Казахстан; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ТОО «Физико-технический институт», ул. Сатпаева, д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7602-3378>; e-mail: girin.sci.kz@gmail.com

Чучвага Николай Алексеевич — PhD (Technical Physics), старший научный сотрудник; ТОО «Научно-производственный

Serekbol Zh. Tokmoldin — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher; Scientific Production Center of Agricultural Engineering, LTD, 312 Raiymbek Ave., Almaty 050005, Republic of Kazakhstan; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, 22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0633-4733>; e-mail: stokmoldin@mail.ru

Vasily V. Klimenov — Chief Technologist; Scientific Production Center of Agricultural Engineering, LTD, 312 Raiymbek Ave., Almaty 050005, Republic of Kazakhstan; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, 22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6836-3033>; e-mail: vasyly_vasyly@mail.ru

Dmitriy V. Girin — Junior Researcher; Scientific Production Center of Agricultural Engineering, LTD, 312 Raiymbek Ave., Almaty 050005, Republic of Kazakhstan; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, 22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7602-3378>; e-mail: girin.sci.kz@gmail.com

Nikolay A. Chuchvaga — PhD (Technical Physics), Senior Researcher; Scientific Production Center of Agricultural

ный центр агроинженерии», просп. Райымбека, д. 312, Алматы, 050005, Республика Казахстан; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ТОО «Физико-технический институт», ул. Сатпаева, д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4417-4996>; e-mail: nikolay.chuchvaga@gmail.com

Аймаганбетов Казыбек Пиржанулы — научный сотрудник, докторант; ТОО «Научно-производственный центр агроинженерии», просп. Райымбека, д. 312, Алматы, 050005, Республика Казахстан; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, ТОО «Физико-технический институт», д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-9135>; e-mail: kazybek012@gmail.com

Кишкенебаев Мусабек Пиржанович — магистрант; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан; e-mail: m.k_022@mail.ru

Тараканова Светлана Николаевна — техник; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ТОО «Физико-технический институт», ул. Сатпаева, д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан; e-mail: sveta25@inbox.ru

Токмолдин Нурлан Серекболович — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; ТОО «Научно-производственный центр агроинженерии», просп. Райымбека, д. 312, Алматы, 050005, Республика Казахстан; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ТОО «Физико-технический институт», ул. Сатпаева, д. 22а, Алматы, 050013, Республика Казахстан; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0663-0228>; e-mail: ntokmoldin@gmail.com

Engineering, LTD, 312 Raiymbek Ave., Almaty 050005, Republic of Kazakhstan; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, 22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4417-4996>; e-mail: nikolay.chuchvaga@gmail.com

Kazybek P. Aimaganbetov — Researcher, Doctoral Student; Scientific Production Center of Agricultural Engineering, LTD, 312 Raiymbek Ave., Almaty 050005, Republic of Kazakhstan; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, 22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-9135>; e-mail: kazybek012@gmail.com

Musabek P. Kishkenebaev — Master's Student; Satbayev University, 22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan; e-mail: m.k_022@mail.ru

Svetlana N. Tarakanova — Technician; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, 22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan; e-mail: sveta25@inbox.ru

Nurlan S. Tokmoldin — PhD., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher; Scientific Production Center of Agricultural Engineering, LTD, 312 Raiymbek Ave., Almaty 050005, Republic of Kazakhstan; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, 22 Satbaev Str., Almaty 050013, Republic of Kazakhstan; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0663-0228>; e-mail: ntokmoldin@gmail.com

*Поступила в редакцию 20.05.2022; поступила после доработки 02.06.2022; принята к публикации 07.06.2022
Received 20 May 2022; Revised 2 June 2022; Accepted 7 June 2022*

* * *