

Труды МАИ. 2024. № 134  
Trudy MAI, 2024, no. 134

Научная статья  
УДК 539.422.52  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178480>

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАССИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

**Аль-Малики Муатаз Наджим Кассим<sup>1</sup>, Леонид Юрьевич Юферев<sup>2</sup>,  
Борис Анатольевич Якимович<sup>3</sup>, Владимир Владиславович Кувшинов<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup>Севастопольский государственный университет,

Севастополь, Россия

<sup>2</sup>«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,

Москва, Россия

<sup>1</sup>[hassamal817@gmail.com](mailto:hassamal817@gmail.com)

<sup>2</sup>[leouf@ya.ru](mailto:leouf@ya.ru)

<sup>3</sup>[yakimovich52@gmail.com](mailto:yakimovich52@gmail.com)

<sup>4</sup>[kuvshinov.vladimir@gmail.com](mailto:kuvshinov.vladimir@gmail.com)

***Аннотация.*** Использование фотоэлектрических преобразователей для авиационной и космической промышленности является очень важной задачей. В частности, на комических аппаратах и станциях это основной источник электрической энергии. При этом при работе полупроводниковых фотоэлементов постоянно возникают какие-нибудь недостатки, авторы данной работы предлагают некоторые решения этой проблемы. Например, перегрев фотопреобразователей приводит к падению их КПД и

снижению энергетических характеристик. Для решения этой задачи авторами был предложен интересный способ уменьшения таких последствий. В работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования, проведены необходимые расчеты и сделаны качественные предложения. В данном исследовании проанализировано влияние пассивного охлаждения на эффективность фотогальванических элементов на основе кремния. Фотоэлектрический элемент (ФЭ) подвергался отводу тепла за счет использования алюминиевого радиатора. Определение размеров радиатора основано на результатах анализа стационарного теплообмена. Экспериментальные исследования проводились при различных температурах окружающей среды и уровнях освещенности вплоть до одного солнца с использованием имитатора солнца. Основываясь на эмпирических данных, полученных в результате применения этой методологии охлаждения, эффективность фотогальванического элемента в преобразовании световой энергии в электрическую значительно повышается. Эффективность фотоэлемента увеличивается на 20% при воздействии излучения интенсивностью  $800 \text{ Вт/м}^2$ . Наиболее значительное снижение температуры отмечается при уровне освещенности  $600 \text{ Вт/м}^2$ . Фотогальванические элементы, как с ребрами, так и без них, демонстрируют улучшенные характеристики при более низких температурах окружающей среды. Проведенные исследования позволяют обеспечить качественную генерацию электрической энергии и снижают зависимость работы солнечных батарей от температуры, что значительно повышает энергетические характеристики энергостанции и обеспечивает надежную генерацию электрической энергии.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в этой работе, позволяют продолжить разработки солнечных установок и значительно могут расширить научные данные о режимах работы фотоэлектрических станций как наземного, так и космического базирования. Эти данные необходимы как для обеспечения надёжной работы авиационно-космической техники, так и для работы наземных энергетических комплексов.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая панель, преобразователь постоянного тока, солнечная электростанция, программное обеспечение MATLAB/Simulink

**Для цитирования:** Аль-Малики М.Н., Юферев Л.Ю., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.

Повышение эффективности кремниевых фотоэлектрических элементов при использовании пассивного охлаждения// Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178480>

Original article

## **PASSIVE COOLING EFFECTS OF SILICON PHOTOELECTRIC CELLS AND THEIR BEHAVIOR**

**Al\_Maliki Muataz Najim Kassim<sup>1</sup>, Leonid Yu. Yuferev<sup>2</sup>,**

**Boris A. Yakimovich<sup>3</sup>, Vladimir V. Kuvshinov<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup>Sevastopol State Technical University,

Sevastopol, Russia

<sup>2</sup>Federal State Scientific Agroengineering Center All-Russian Institute for Mechanization,  
Moscow, Russia

<sup>1</sup>[hassamal817@gmail.com](mailto:hassamal817@gmail.com)

<sup>2</sup>[leouf@ya.ru](mailto:leouf@ya.ru)

<sup>3</sup>[yakimovich52@gmail.com](mailto:yakimovich52@gmail.com)

<sup>4</sup>[kuvshinov.vladimir@gmail.com](mailto:kuvshinov.vladimir@gmail.com)

**Abstract:** Application of photovoltaic converters for the aviation and space industries represents a very important task. In particular, it is the main source of electrical energy at space vehicles and stations. Certain drawbacks constantly arise herewith during the semiconductor photocells operation. The authors of the presented article propose several solutions to this problem. The photoconverters overheating, for example, leads to their efficiency degradation and energy characteristics deterioration. For this problem solving, the authors proposed an interesting technique for the said consequences mitigation. Theoretical and experimental studies were conducted, the necessary computations were performed and qualitative proposals were made during this work. The presented study analyzes the effect of passive cooling on the efficiency of the silicon-based photovoltaic cells. The photovoltaic cell (PV) was subjected to heat dissipation through the aluminum heat sink. The radiator sizing is based on the results of the stationary heat transfer analysis. The experimental studies were conducted at various ambient temperatures and illumination levels up to one sun with a sun simulator. Based on the empirical data obtained by applying this cooling methodology, the photovoltaic cell efficiency in converting light energy into electrical energy is greatly improved. The efficiency of the photocell increases by 20% when exposed to radiation with an intensity of  $800 \text{ W/m}^2$ . The most

significant temperature reduction is being noted at an illumination level of 600 W/m<sup>2</sup>. Photovoltaic cells, both with and without fins, demonstrate improved performance at lower ambient temperatures. The studies being performed allow ensuring high-quality generation of the electric energy and reducing the dependence of the solar panels operation on temperature, which significantly improves the energy characteristics of the power plant and ensures reliable electrical energy generation. Theoretical and experimental studies performed in the course of this work allow continuing the solar installations development and may significantly expand scientific data on the operating modes of photovoltaic stations, both ground-based and space-based. This data is necessary for both ensuring reliable operation of aerospace equipment and for the ground-based power systems operation.

**Keywords:** photovoltaic panel, DC-DC converter, solar plant, MATLAB/Simulink

**For citation:** Al-Maliki M.N., Yuferev L.Y., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Passive cooling effects of silicon photoelectric cells and their behavior. *Trudy MAI*, 2024, no. 134.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178480>

## Введение

Помимо важности создания инновационных производственных процессов для фотогальваники (фотовольтаики), важно предложить наиболее подходящую операцию для условий фотогальванической системы. Используемые в настоящее время коммерческие фотоэлектрические системы преобразуют солнечную энергию в электричество с относительно низким КПД, равным 20% [1-3]. Соответственно 80%

поглощаемой энергии выделяется в виде тепловых потерь и идёт на нагрев солнечного элемента. Это отработанное тепло производится двумя различными способами. Во-первых, это тепловая энергия, представляющая собой сумму реализованной электрической энергии произведенных электронов и поглощенных солнечных фотонов [4]. Во-вторых, тепловой нагрев возникает из-за тока, проходящего через сопротивление фотоэлектрического преобразователя. В результате температура солнечных элементов имеет решающее значение для их работы [5], рассмотрев зависимость производительности и температуры, свойства солнечных элементов и преобразование энергии, видно, что эффективность солнечных элементов снижается по мере повышения температуры элемента. Снижение вызвано падением вольтажных характеристик солнечных элементов, поэтому важно поддерживать низкую температуру солнечного элемента и самую минимальную степень отражения элемента для повышения эффективности фотогальваники [6-8]. В течение многих лет ученые исследовали технологию работы фотоэлектрических элементов, использующую воздушное или водяное охлаждение. Один из лучших способов сократить расходы — пассивное охлаждение — подходящий уровень охлаждения для солнечных элементов [9]. Этот естественный метод охлаждения солнечного элемента без использования вентилятора, насоса или другого устройства для отвода тепла использует недорогие натяжные поверхности. В результате пассивное охлаждение является наиболее доступным методом [10-12]. Хуанг и др. впервые описал экспериментальную оценку материалов с фазовым переходом для управления тепловым режимом солнечных устройств. Согласно

экспериментальным данным, температура фотоэлектрических элементов интегрированных в конструкции зданий может быть снижена более чем на 30 градусов Цельсия. Охлаждение производилось, с использованием обратного и структурный эксперимент при наличии воды. Целью исследования было повышение эффективности фотоэлектрических модулей. При этом охлаждение фотогальванической панели достигалось за счет образования капель воды на верхней поверхности. Согласно экспериментальным данным, в условиях пиковой радиации производительность системы увеличивалась на 15% [13]. Абдользаде и Аль-Амери для повышения эффективности фотоэлектрической системы использовали систему перекачки воды путем распыления воды на переднюю часть фотоэлементов. Фронты солнечных элементов смачиваются для создания экспериментальной системы накачки. В этом исследовании использовалась 225-Ваттная фотоэлектрическая система откачки воды. Было продемонстрировано, что камеры туманообразования с водой повышают общую эффективность, эффективность подсистемы и фотоэлектрической ячейки на 3,26, 1,40 и 1,35% соответственно, чтобы эффективно отводить тепло от плотно упакованных солнечных элементов в высококонцентрированных системах [14-16].

Экспериментальная установка состояла из фотоэлектрической панели, имитатора солнечной энергии, диспетчерской и измерительных инструментов.

Для проведения испытаний при любом постоянном уровне освещенности был создан имитатор солнца. В имитаторе солнечной энергии, показанном на рис. 1а, установлено 12 вольфрамовых галогенных ламп. Система освещения может дать столько света,

сколько 12 солнц. Он располагался на крыше диспетчерской внутри колпака. В электрощите была установлена встроенная электронная схема. С помощью потенциометра, прикрепленного к электрической панели, интенсивность освещения можно было изменить на любое постоянное значение [17].

Для измерения интенсивности освещения использовался пиранометр Kipp & Zonen CMP 11 с высокой линейностью и низкой ошибкой наклона. С помощью мультиметров FLUKE 87V с погрешностью измерения постоянного тока 0,2 % и постоянного напряжения 0,06 % были оценены электрические свойства фотоэлемента [18]. Сопротивление цепи регулировалось с помощью реостата 1100 В, 0,8 А. Температуру и влажность в диспетчерской измеряли с помощью влаготемпературного измерителя LUTRON HT 3006HA [18-20]. Температуру ячейки определяли с помощью инфракрасного высокотемпературного термометра EXTECH. На рис. 1с изображено измерительное оборудование, что касается точности экспериментальных данных, калибровка имитатора солнечной активности имеет решающее значение. Перед началом экспериментов расстояние между симулятором солнечной батареи и фотоэлементами было рассчитано в зависимости от электрических свойств фотоэлемента, предоставленных производителем для типичных условий испытаний. Результаты моделирования и отчет о данных производителя хорошо согласовывались. Испытания проводились в диапазоне интенсивности света 200–800 Вт/м<sup>2</sup> [21-23]. Температура в диспетчерской была изменена на 25°C. В экспериментальной работе были исследованы два идентичных фотоэлемента из поликристаллического кремния. Как видно на рис. 2а,

в одном из фотоэлементов был установлен алюминиевый радиатор, а в другом — нет. Между радиатором и задней поверхностью фотоэлемента использовалась термопаста. Компенсируя неровности поверхностей компонентов, термопаста представляет собой жидкость, улучшающую теплопроводность термоинтерфейса. Сзади PV радиатор был прикреплен к ячейке угловых точек с помощью клея [24,25]. В радиаторе экспериментального исследования использовалось специальное для электроники высокоэффективное устройство рассеивания тепла. При определении размеров радиатора учитывались данные о стабильной теплоотдаче.



Рис. 1. Симулятор солнечного излучения (а), диспетчерская (б) и измерительные приборы (с).



A

b

Рис. 2. Фотоэлементы с оребрением и без оребрения (а), и с прямым оребрением  
одинакового сечения (b)

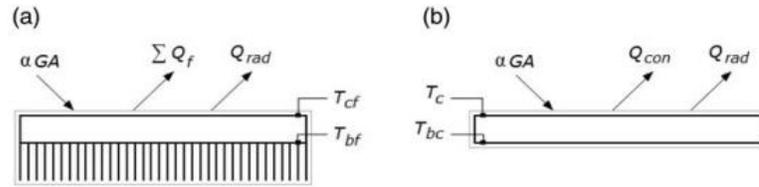


Рис. 3. Конвекционные и радиационные потери с поверхности фотоэлемента (а) с  
ребрами и (b) без ребер

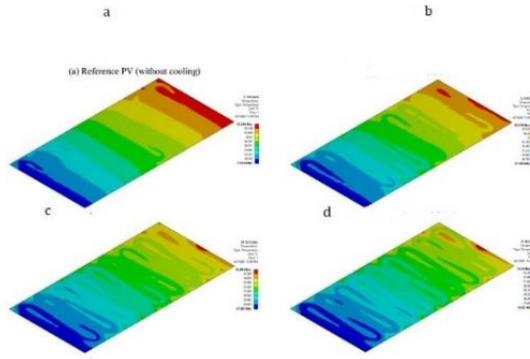


Рис. 4. Профили температуры поверхности фотоэлектрического элемента с ребрами  
для (а) 200, (б) 400, (в) 600 и (г) 800 Вт/м<sup>2</sup>.

*Анализ теплопередачи*

Предполагается, что ребра на рисунке 2b имеют одинаковую площадь поперечного сечения для целей анализа теплопередачи. Для рекомендуемых ребер:

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} - u^2 \delta = 0 \tag{1}$$

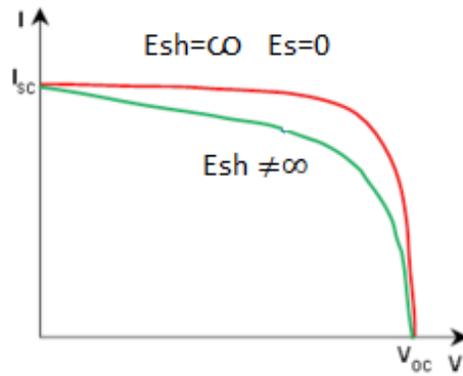


Рис. 5. Влияние сопротивления шунта на вольт-амперные характеристики солнечного элемента.

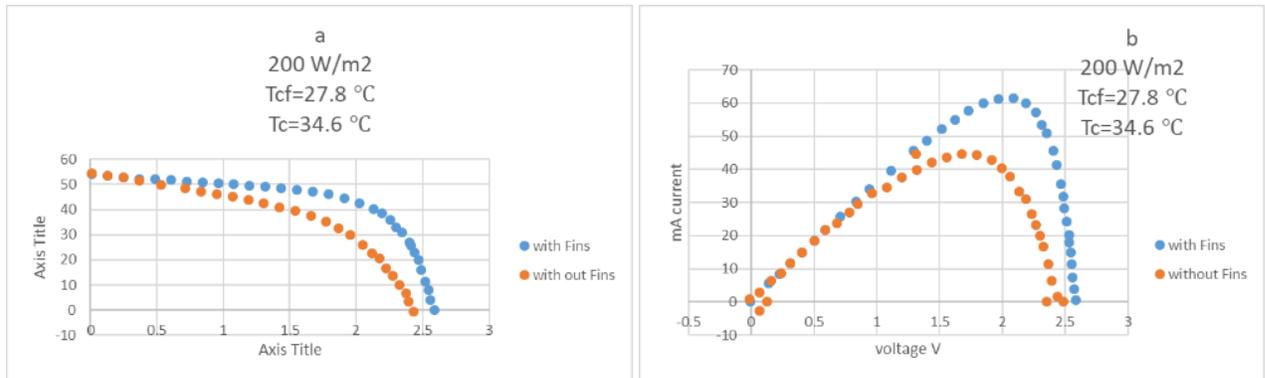


Рис. 6. Характеристики фотогальванических элементов

На рис. 6 показаны характеристики фотогальванических элементов с ребрами и без них для мощности 200 Вт/м<sup>2</sup> в зависимости от вольтамперной характеристики (а) и мощности (б).

$$\delta(x) = T(x) - T(\infty) \text{ and } u^2 = \frac{hp}{kD'_c} \quad (2)$$

Общее решение уравнения (2):

$$\delta(x) = C_1 e^{ux} + C_2 e^{-ux} \quad (3)$$

$$\delta_{bf} = T_{bf} - T_\infty \quad (4)$$

где основание панелей указано нижним индексом bf.

Первое условие теплообменника (абсорбера) гласит, что скорость, с которой энергия конвективно передается от конца к жидкости, должна быть равна скорости, с которой энергия передается через ребро к абсорберу [26].

$$h\delta(L) = -K \left. \frac{d\delta}{dx} \right|_{x=L} \quad (5)$$

Где  $k$  — теплопроводность, а  $L$  — длина ребер.

Следующее распределение температуры получается путем подстановки уравнения (5) в уравнения (3 и 4):

$$\frac{\delta}{\delta_{bc}} = \frac{\cosh u(L-x) + \left(\frac{h}{uK}\right) \sinh u(L-x)}{\cosh mL + \left(\frac{h}{uK}\right) \sinh uL} \quad (6)$$

Применение закона Фурье к основанию ребра дает количество тепла, переданного от всего ребра.

$$q_f = -KD \left. \frac{d\delta}{dx} \right|_{x=0} \quad (7)$$

$$q_f = \sqrt{hpKD} \delta_{bf} \frac{\sinh uL + \left(\frac{h}{uK}\right) \cosh uL}{\cosh uL + \left(\frac{h}{uK}\right) \sinh uL} \quad (8)$$

В таблице 1 перечислены измеренные и рассчитанные параметры экспериментального исследования.

	С ребрами $M(W/m^2)$				Без ребер $M(W/m^2)$			
	200	400	600	800	200	400	600	800
$T_c$ (°C)	27.8	36.5	43.6	50.41	34.6	46.3	56.7	68
$I_{sc}$ (m.A)	44.91	134.43	241.47	366.61	45.52	136.51	247.02	368.1

$V_{OC}$ (V)	2.03	2.13	2.12	2.11	1.94	2.01	1.98	1.91
$\eta_e$	3.49	5.35	6.39	7.24	3.32	5.18	6.17	6.62
$\eta_{pce}$	2.93	4.51	5.35	6.04	2.42	4.07	5.05	5.35
$\eta_{ex}$	2.32	3.67	4.31	4.77	1.68	3.18	3.98	3.97
$W_u$ (m.W)	50.19	188.05	325.95	463.83	42.02	161.01	279.97	398.97

Для каждой интенсивности освещения общее количество тепла, переданного от ребер, рассчитывается следующим образом:

$$\sum q_f = Nq_f \quad (9)$$

Где  $N$  - количество ребер.

Для расчета скорости радиационного теплообмена с поверхности фотоэлемента используется следующая формула:

$$q_{rad} = \xi \sigma D_c (T_c^4 - T_{amb}^4) \quad (10)$$

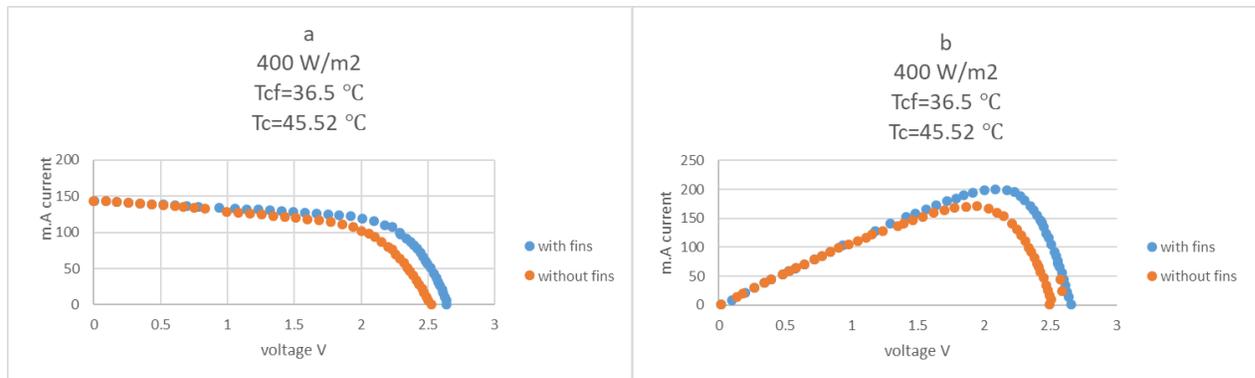


Рис. 7. Характеристики фотогальванических элементов с оребрением и без него

На рис. 7 показаны характеристики фотогальванических элементов с оребрением и без него для мощности  $400 \text{ Вт/м}^2$  в терминах вольт-амперная (а) и мощность-напряженная (б).

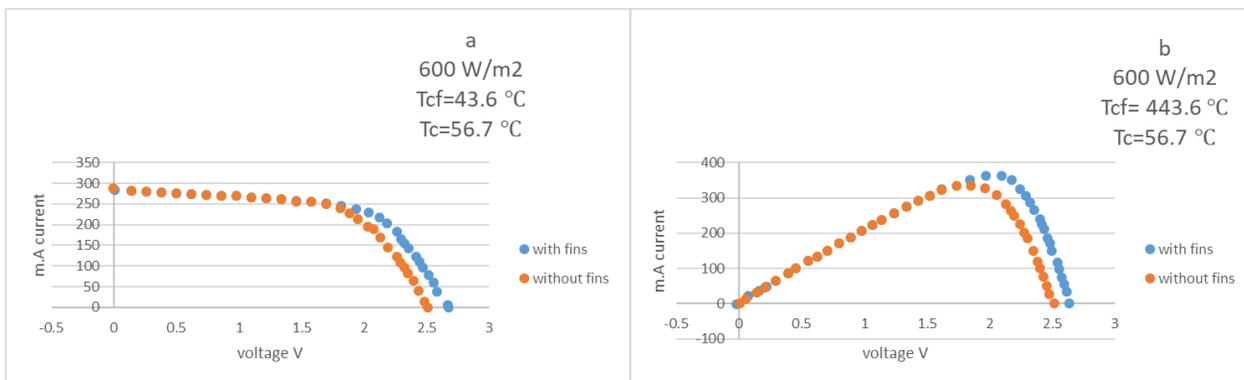


Рис. 8. Вольт-амперные (а) и вольт-амперные (б) характеристики фотогальванических элементов на 600 Вт/м<sup>2</sup> с ребрением и без него

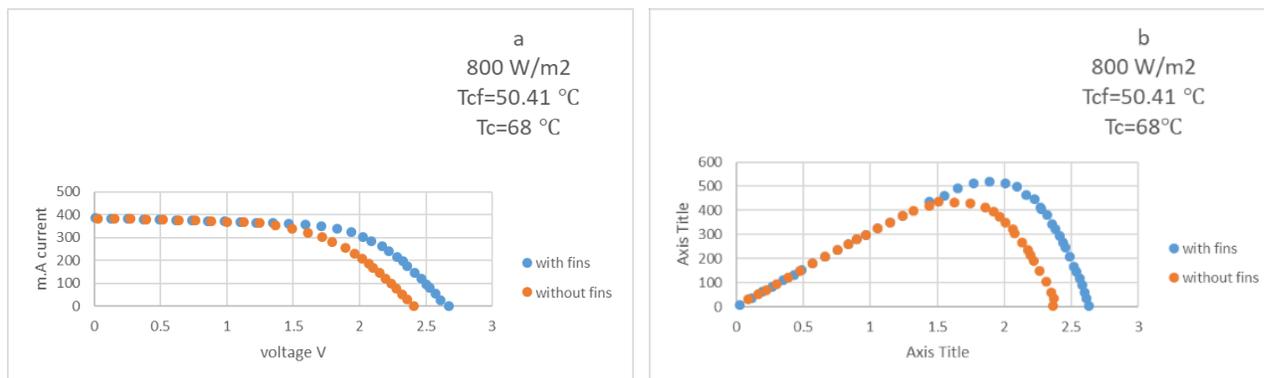


Рис. 9. Характеристики фотогальванических элементов для мощности 800 Вт/м<sup>2</sup>

На рис. 9 показаны характеристики фотогальванических элементов с ребрами и без них для мощности 800 Вт/м<sup>2</sup> в зависимости от вольтамперной характеристики (а) и мощности (б).

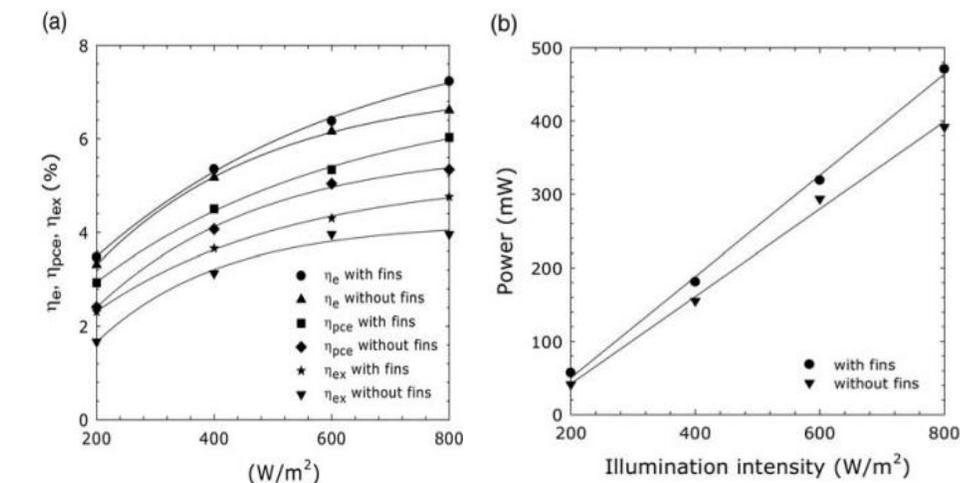


Рис. 10. КПД фотогальванических элементов

где  $\epsilon$  — коэффициент излучения,  $s$  — постоянная Стефана-Больцмана ( $5,67 \times 10^{-18}$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), а буквы рад и амбр обозначают соответственно потери на излучение и окружающую среду. Как показано на рис. 3, общее количество тепла, передаваемого от всей фотоэлектрической ячейки с ребрами и без них, рассчитывается с учетом конвекционных и радиационных потерь.

На рис. 10 показаны КПД фотогальванических элементов (а) и максимальная выходная мощность (б) для диапазона интенсивности света. Затем отображался наивысший достигнутый уровень охлаждения. Поверхность фотоэлемента с ребрами демонстрирует почти равномерное распределение температуры, как видно на рисунках 4а–д. Как и следовало ожидать, на поверхности фотоэлемента без ребер распределение температуры абсолютно однородно. Параллельные каналы с высокой проводимостью (шунты), которые пересекают р-п переход солнечного элемента или присутствуют на краях элемента, представлены сопротивлением шунта  $E_{sh}$ . Как показано на рис. 5, сопротивление шунта оказывает значительное влияние на вольт-амперную характеристику фотоэлемента. С повышением температуры ячейки шунтирующее сопротивление фотоэлектрической ячейки снижается. В результате энергоемкость фотоэлектрического элемента падает, особенно при низкой интенсивности. На рис. 6а сравниваются вольт-амперные характеристики фотоэлементов при интенсивности света 200 Вт/м<sup>2</sup>. На вольт-амперную характеристику фотоэлементов без ребер заметное влияние оказывает уменьшение сопротивления шунта. Вольт-амперные характеристики фотоэлементов при уровне интенсивности 200 Вт/м<sup>2</sup> представлены на рис. 6б.

Повышение температуры фотоэлемента вызывает падение выходной мощности. Это снижение связано с падением характеристик напряжения фотоэлектрических элементов. Из-за более низкой температуры ячейки фотоэлектрическая ячейка с ребрами производит больше электроэнергии, чем без ребер. При интенсивности освещения  $200 \text{ Вт/м}^2$  технология пассивного охлаждения приводит к увеличению мощности энергии на  $8 \text{ МВт}$  по сравнению с корпусом без ребер. Как показано в таблице 1, увеличение выработки электроэнергии составляет  $27, 46$  и  $65 \text{ МВт}$  для  $400, 600$  и  $800 \text{ Вт/м}^2$  соответственно. Как видно из рис. 7а, 8а и 9а, преобладающее влияние шунтирующего сопротивления на вольт-амперную характеристику фотоэлектрических элементов без ребер уменьшается с ростом уровня интенсивности. Несмотря на менее благоприятные характеристики тока, чем фотоэлементы без ребер, фотоэлементы с ребрами производят больше энергии из-за более низкой температуры их элементов. На рисунках 7b, 8b и 9b показано сравнение максимальной выходной электрической мощности фотоэлементов.

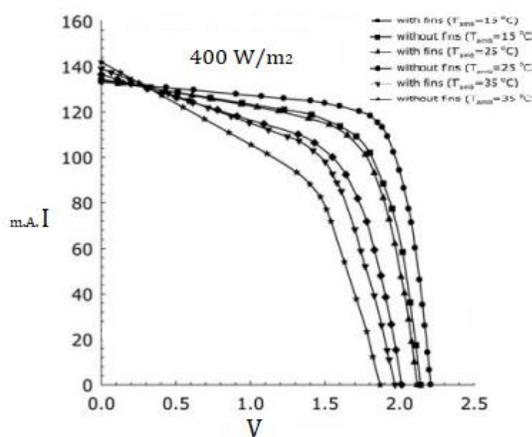


Рис. 11. Вольт-амперные характеристики солнечных элементов

На рис. 11 показаны вольт-амперные характеристики солнечных элементов для различных температур окружающей среды как с оребрением, так и без него.

Как показано на рис. 10а, эффективность преобразования энергии, энергии и мощности фотоэлектрических элементов экспоненциально возрастает с увеличением уровней интенсивности. Энергия, преобразование мощности и энергоэффективность повышаются на 9, 13 и 20% соответственно при использовании метода пассивного охлаждения. На рис. 10б показано, что по мере увеличения уровня освещенности увеличивается разница между выходной электрической мощностью фотоэлементов. Таким образом, если обеспечено достаточное охлаждение, технология пассивного охлаждения подходит для концентрированных фотоэлектрических систем.

Таблица 2. Результаты для различных температур окружающей среды

	$T_{amb}(^{\circ}C)$ , с плавников				$T_{amb}(^{\circ}C)$ , без плавников			
	15	25	35		15	25	35	
$T_c (^{\circ}C)$	22.2	36.5	50.15		30.05	46.25	62.3	
$I_{sc}(m.A)$	133.2	134.43	139.2		134.01	136.6	142.12	
$V_{oc} (V)$	2.22	2.13	1.98		2.15	2.02	1.88	
$\eta_e$	5.54	5.35	5.16		5.39	5.16	4.98	
$\eta_{pce}$	4.96	4.51	3.92		4.59	4.08	3.52	
$\eta_{ex}$	4.35	3.67	2.99		3.78	3.13	2.48	

$W_u(m.W)$	213.7	188.05	147,18		186.74	161.01	123.35	
------------	-------	--------	--------	--	--------	--------	--------	--

Таблица 3. Тепловыделение фотогальванического элемента с ребрами и без них.

		$W/m^2$			
		200	400	600	800
$q_{tf}(W)$		---	5.48	9.08	12.04
$q_t(W)$		---	4.54	6.95	9.7
$T_c(^{\circ}C)$		34.6	46.3	56.7	67.95
$T_{bc}(^{\circ}C)$		33.4	43.85	52.9	63
$T_{cf}(^{\circ}C)$		27.8	36.7	43.8	50.5
$T_{bf}(^{\circ}C)$		26.2	30.4	33.8	36.5

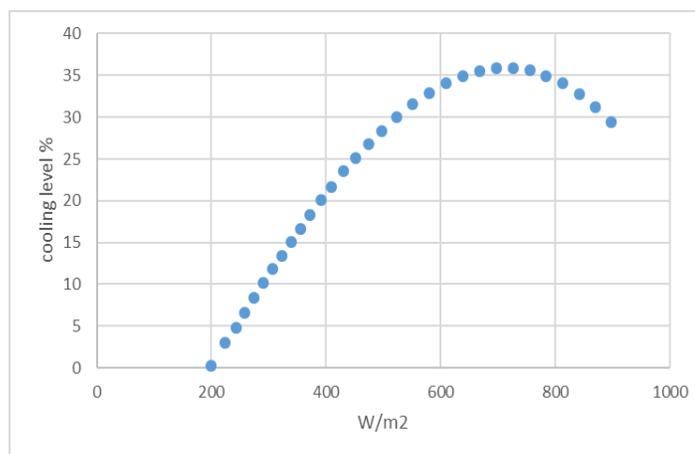


Рис. 12. Уровень охлаждения, достигаемый для каждого уровня интенсивности освещения.

Кроме того, исследования проводились при различных температурах окружающей среды. Как видно на рисунке 11, с ростом температуры окружающей среды увеличивается влияние сопротивления шунта на ВАХ. Как показано в таблице 2, максимальная выходная мощность фотоэлементов с ребрами и без них увеличивается с падением температуры окружающей среды. Фотоэлемент с ребрами производит на 14,4% больше энергии, чем без ребер при температуре окружающей среды 15 °С.

## Выводы

В этом исследовании исследуется влияние пассивного охлаждения на рабочие характеристики кремниевых фотоэлементов при различных условиях излучения. Для каждого освещения рассчитываются максимальная выходная мощность и эффективность фотоэлементов с ребрением и без него. Результаты и интенсивность

противопоставлены. Ниже приводится краткое изложение конкретных результатов исследования.

1. С увеличением уровней интенсивности эффективность преобразования энергии, эксергии и мощности фотоэлектрических элементов как с ребрами, так и без них возрастает экспоненциально. Энергия, преобразование мощности и энергоэффективность повышаются на 9, 13 и 20% соответственно, когда фотоэлементы подвергаются воздействию интенсивности освещения  $800 \text{ Вт/м}^2$ . Максимальная выходная мощность фотоэлементов падает по мере повышения температуры элемента. Это снижение связано с падением характеристик напряжения фотоэлектрических элементов. Согласно экспериментальным данным, фотоэлемент с ребрением производит больше электроэнергии, чем элемент без ребрения для каждого уровня освещенности, потому что он имеет более низкую температуру элемента. Доля увеличения выходной мощности при освещенности 200, 400, 600 и  $800 \text{ Вт/м}^2$  составляет 8, 27, 46 и 65.
2. Сопротивление шунта оказывает значительное влияние на вольт-амперную характеристику фотоэлектрического элемента. Из экспериментальных данных видно, что основное влияние сопротивления шунта на вольт-амперную характеристику фотоэлектрического элемента без ребер уменьшается с ростом напряжения.

## Список источников

1. Shah T.R., Ali H.M. Application of hybrid nanofluids in solar energy, practical limitations and challenges: a critical review // Solar Energy, 2019, vol. 183, pp. 173-203. DOI: [10.1016/j.solener.2019.03.012](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.012)
2. Абдали Л.М., Исса Х.А., Аль-Малики М.Н., Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25 (77). С. 75-85.
3. Abo-Elyousr F.K., Abdelshafy A.M., Abdelaziz A.Y. MPPT-Based article Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In book: Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems, Springer, Cham, Switzerland, 2020, pp. 379–400.
4. Zhang Q., Ning Xu., Ye Z. MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method // Electric Engineering, 2018, vol. 2, pp. 55-57.
5. Yadav P.K., Thirumaliah S., Haritha G. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2012, vol. 1, issue 1.
6. Jumpasri N, Pinsuntia K, Woranetsuttikul K, Nilsakorn T, Khanngern W. Improved particle swarm optimization algorithm using average model on MPPT for partial shading in PV

array // International electronics engineering congress, 2014. pp 1–4. DOI: [10.1109/iEECON.2014.6925856](https://doi.org/10.1109/iEECON.2014.6925856)

7. Исса Х.А., Абдали Л.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Федотикова М.В. Сравнение эффективности различных методов управления энергетическими параметрами фотоэлектрических систем // Труды МАИ. 2023. № 128.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171405>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-17)

8. Drwiega Andrzej, Qays Adnan Ali, Marek Dudek, Nihad Raouf Maarroof, Layth Mohammed Abdali, And Boris A. Yakimovich. Maximization the latent heat storage unit (LHSU) energy saving using simulated annealing algorithm // MM Science Journal, 2023. DOI:

[10.17973/MMSJ.2023\\_06\\_2023025](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_06_2023025)

9. Ahmed Mohmmmed H., Anssari M.O.H. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell) // Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, no. 14, pp.

4414-4418. DOI: [10.3923/jeasci.2019.4414.4418](https://doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418)

10. Ismail B., Taib S., Saad A.R.M. et al. Development of a single phase SPWM microcontroller-based inverter // Power and Energy Conference, PECon '06, IEEE

International, 2006, pp. 437–440. DOI: [10.1109/PECON.2006.346691](https://doi.org/10.1109/PECON.2006.346691)

11. Layth M. Abd Ali, L.M. Ali, Q.A., Klačková I., Issa H.A., Yakimovich, B.A., Kuvshimov V.V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment // Acta Montanistica Slovaca, 2021, vol. 26

(4), pp. 773-783. DOI: [10.46544/AMS.v26i4.14](https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14)

12. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. et al. Study of Hybrid Wind—Solar Systems for the Iraq Energy Complex // Applied Solar Energy, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. DOI: [10.3103/S0003701X20040027](https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027)
13. Aouchiche N., Aitcheikh M.S., Becherif M., Ebrahim M.A. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach // Solar Energy, 2018, vol. 171, pp. 593–603. DOI: [10.1016/j.solener.2018.06.109](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.109)
14. Pathy S., Subramani C., Sridhar R., Thentral T., Padmanaban S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study // Energies, 2019, vol. 12, pp. 1451. DOI: [10.3390/en12081451](https://doi.org/10.3390/en12081451)
15. Samosir A.S., Yatim A. H. M. Dynamic evolution control for synchronous buck dc-dc converter: Theory, model and simulation // Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, vol. 18, pp. 663-676. DOI: [10.1016/j.simpat.2010.01.010](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.01.010)
16. B. Sanjay Gandhi, S. Sam Chelladurai, Dr. D. Senthil Kumaran. Process Optimization for Biodiesel Synthesis from Jatropha Curcas Oil // Distributed Generation and Alternative Energy Journal, 2011, vol. 23, no. 4, pp. 6-16. DOI: [10.1080/21563306.2011.10462201](https://doi.org/10.1080/21563306.2011.10462201)
17. Тепликова В.И., Сенцов А.А., Ненашев В.А., Поляков В.Б. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168189>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17)
18. Абдали Л.М.А., Аль-Малики М.Н.К., Аль Баирмани А.Г. и др. Анализ методов управления производительностью преобразователей постоянного тока солнечных

- элементов и выбор оптимального метода // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21. № 1. С. 125-137. DOI: [10.22213/2410-9304-2023-1-125-137](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2023-1-125-137)
19. Belkaid A., Colak I., Kayisli K. Implementation of a modified P&O-TMMT algorithm adapted for varying solar radiation conditions // Electrical Engineering, 2017, vol. 99, pp. 839–846. DOI: [10.1007/s00202-016-0457-3](https://doi.org/10.1007/s00202-016-0457-3)
20. Абдали Л.М., Аль-Малики М.Н., Кувшинов В.В. Кузнецов П.Н., Морозова Н.В. Математическое моделирование с использованием алгоритма контроля точки максимальной мощности для фотоэлектрической системы // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174619>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-20)
21. Jaypalsinh Chauhan. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based Photovoltaic Systems // Conference Energy Efficient Technologies for Sustainability, 2013. DOI: [10.1109/ICEETS.2013.6533431](https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533431)
22. King D.L. Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions // AIP Conference Proceedings, 1997, vol. 394, pp. 347–368. DOI: [10.1063/1.52852](https://doi.org/10.1063/1.52852)
23. Himri Y., Malik A.S., Stambouli A.B. et al. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, vol. 13, pp. 1584–1591. DOI: [10.1016/j.rser.2008.09.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.007)
24. Абдали Л.М., Якимович Б.А., Сяктерева В.В., Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Оптимизация системы автоматического управления точкой максимальной мощности для ветро-солнечной генерирующей установки с накопителями энергии // Труды МАИ.

2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173037>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-24)

25. Волков А.С. Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171396>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)

26. Соколов Н.Л. Анализ комбинированных способов формирования орбит искусственного спутника планет // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69701>

## References

1. Shah T.R., Ali H.M. Application of hybrid nanofluids in solar energy, practical limitations and challenges: a critical review, *Solar Energy*, 2019, vol. 183, pp. 173-203. DOI: [10.1016/j.solener.2019.03.012](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.012)

2. Abdali L.M., Issa Kh.A., Al'-Maliki M.N., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*, 2022, no. 25 (77), pp. 75-85.

3. Abo-Elyousr F.K., Abdelshafy A.M., Abdelaziz A.Y. *MPPT-Based article Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In book: Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*, Springer, Cham, Switzerland, 2020, pp. 379–400.

4. Zhang Q., Ning Xu., Ye Z. MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method, *Electric Engineering*, 2018, vol. 2, pp. 55-57.

5. Yadav P.K., Thirumaliah S., Haritha G. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2012, vol. 1, issue 1.
6. Jumpasri N, Pinsuntia K, Woranetsuttikul K, Nilsakorn T, Khanngern W. Improved particle swarm optimization algorithm using average model on MPPT for partial shading in PV array, *International electronics engineering congress*, 2014. pp 1–4. DOI: [10.1109/iEECON.2014.6925856](https://doi.org/10.1109/iEECON.2014.6925856)
7. Issa Kh.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Morozova N.V., Fedotikova M.V. *Trudy MAI*, 2023, no 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171405>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-17)
8. Drwiega Andrzej, Qays Adnan Ali, Marek Dudek, Nihad Raouf Maarouf, Layth Mohammed Abdali, And Boris A. Yakimovich. Maximization the latent heat storage unit (LHSU) energy saving using simulated annealing algorithm, *MM Science Journal*, 2023. DOI: [10.17973/MMSJ.2023\\_06\\_2023025](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_06_2023025)
9. Ahmed Mohammed H., Anssari M.O.H. Electricity generation by using a hybrid system (photovoltaic and fuel cell), *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, no. 14, pp. 4414-4418. DOI: [10.3923/jeasci.2019.4414.4418](https://doi.org/10.3923/jeasci.2019.4414.4418)
10. Ismail B., Taib S., Saad A.R.M. et al. Development of a single phase SPWM microcontroller-based inverter, *Power and Energy Conference, PECon '06*, IEEE International, 2006, pp. 437–440. DOI: [10.1109/PECON.2006.346691](https://doi.org/10.1109/PECON.2006.346691)

11. Layth M. Abd Ali, L.M. Ali, Q.A., Klačková I., Issa H.A., Yakimovich, B.A., Kuvshimov V.V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment, *Acta Montanistica Slovaca*, 2021, vol. 26 (4), pp. 773-783. DOI: [10.46544/AMS.v26i4.14](https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14)
12. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. et al. Study of Hybrid Wind—Solar Systems for the Iraq Energy Complex, *Applied Solar Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. DOI: [10.3103/S0003701X20040027](https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027)
13. Aouchiche N., Aitcheikh M.S., Becherif M., Ebrahim M.A. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach, *Solar Energy*, 2018, vol. 171, pp. 593–603. DOI: [10.1016/j.solener.2018.06.109](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.109)
14. Pathy S., Subramani C., Sridhar R., Thentral T., Padmanaban S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study, *Energies*, 2019, vol. 12, pp. 1451. DOI: [10.3390/en12081451](https://doi.org/10.3390/en12081451)
15. Samosir A.S., Yatim A. H. M. Dynamic evolution control for synchronous buck dc-dc converter: Theory, model and simulation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2010, vol. 18, pp. 663-676. DOI: [10.1016/j.simpat.2010.01.010](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.01.010)
16. B. Sanjay Gandhi, S. Sam Chelladurai, Dr. D. Senthil Kumaran. Process Optimization for Biodiesel Synthesis from Jatropha Curcas Oil, *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, 2011, vol. 23, no. 4, pp. 6-16. DOI: [10.1080/21563306.2011.10462201](https://doi.org/10.1080/21563306.2011.10462201)
17. Teplikova V.I., Sentsov A.A., Nenashev V.A., Polyakov V.B. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168189>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17)

18. Abdali L.M.A., Al'-Maliki M.N.K., Al' Bairmani A.G. et al. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2023, vol. 21, no. 1, pp. 125-137. DOI: [10.22213/2410-9304-2023-1-125-137](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2023-1-125-137)
19. Belkaid A., Colak I., Kayisli K. Implementation of a modified P&O-TMMT algorithm adapted for varying solar radiation conditions, *Electrical Engineering*, 2017, vol. 99, pp. 839–846. DOI: [10.1007/s00202-016-0457-3](https://doi.org/10.1007/s00202-016-0457-3)
20. Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Kuvshinov V.V. Kuznetsov P.N., Morozova N.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174619>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-20)
21. Jaypalsinh Chauhan. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based Photovoltaic Systems, *Conference Energy Efficient Technologies for Sustainability*, 2013. DOI: [10.1109/ICEETS.2013.6533431](https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533431)
22. King D.L. Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions, *AIP Conference Proceedings*, 1997, vol. 394, pp. 347–368. DOI: [10.1063/1.52852](https://doi.org/10.1063/1.52852)
23. Himri Y., Malik A.S., Stambouli A.B. et al. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, pp. 1584–1591. DOI: [10.1016/j.rser.2008.09.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.007)
24. Abdali L.M., Yakimovich B.A., Syaktereva V.V., Kuvshinov V.V., Morozova N.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173037>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-24)

25. Volkov A.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171396>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)
26. Sokolov N.L. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69701>

Статья поступила в редакцию 09.12.2023

Одобрена после рецензирования 12.12.2023

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 09.12.2023; approved after reviewing on 12.12.2023; accepted for publication on 27.02.2024