

УДК 621.383
EDN: UUBYKY

PACS: 84.60.Jt

Разработка экспериментального устройства для автоматизированного измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов

А. В. Саенко, Г. Е. Билык, В. В. Жейц

Представлен емкостной метод и разработано экспериментальное устройство для автоматизированного измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов. Метод заключается в использовании в качестве переменной нагрузки емкости конденсатора для автоматизации процесса измерения. Основное преимущество данного метода заключается в быстроте измерения вольт-амперной характеристики солнечного элемента, что позволяет повысить точность и равномерность измеряемых фотоэлектрических параметров за счет снижения негативных внешних воздействий во времени, в частности нагрева солнечного элемента и нестабильности источника освещения. Проведенные измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов с использованием разработанного экспериментального устройства показали, что погрешность полученных фотоэлектрических параметров по сравнению с заявленными в спецификации значениями составляет порядка 5 %, что подтверждает высокую точность представленного метода измерения.

Ключевые слова: солнечный элемент, емкостной метод, вольт-амперная характеристика, фотоэлектрические параметры.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-79-85

Введение

В настоящее время повышение эффективности преобразования солнечной энергии и снижение стоимости изготовления солнечных элементов являются основными задачами солнечной энергетики. В связи с этим существенное значение имеет контроль и оптими-

зация фотоэлектрических параметров при изготовлении солнечных элементов (панелей), что требует разработки перспективных методов и устройств измерения их фотоэлектрических характеристик и определения параметров [1, 2].

Основной характеристикой солнечного элемента является его вольт-амперная характеристика, которая измеряется для определения таких фотоэлектрических параметров, как ток короткого замыкания (I_{sc}), напряжение холостого хода (V_{oc}) и точка максимальной мощности (P_{max}), при которой солнечный элемент работает с максимальной эффективностью преобразования энергии (η). При работе солнечного элемента в качестве источника электроэнергии к его выводам подсоединяется сопротивление нагрузки (R_{load}). При этом вольт-амперная характеристика имеет две крайние точки, соответствующие режиму короткого замыкания ($R_{load} = 0$), при котором

Саенко Александр Викторович, доцент, к.т.н.

E-mail: avsaenko@sfnedu.ru

Билык Герман Евгеньевич, вед. инженер-конструктор.

E-mail: bilyk@sfnedu.ru

Жейц Виталий Владимирович, студент.

E-mail: vzhyauc@sfnedu.ru

Южный федеральный университет.

Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону,

ул. Большая Садовая, 105/42.

Статья поступила в редакцию 16.07.2024

Принята к публикации

Шифр научной специальности: 2.2.4

© Саенко А. В., Билык Г. Е., Жейц В. В., 2024

солнечный элемент генерирует максимальный ток (I_{sc}) при нулевом напряжении смещения p - n -перехода, и режиму холостого хода ($R_{load} = \infty$), при котором солнечный элемент имеет максимальное напряжение смещения p - n -перехода (V_{oc}) при нулевом генерируемом токе. Фотоэлектрические параметры солнечного элемента связаны следующим соотношением [3–5]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{sun}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{sun}} = \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{P_{sun}}, \quad (1)$$

где η – эффективность преобразования энергии; P_{max} – максимальная генерируемая мощность (точка максимальной мощности), соответствующая номинальным значениям генерируемого тока I_{mpp} и напряжения V_{mpp} ; P_{sun} – мощность падающего солнечного излучения; FF – фактор заполнения вольт-амперной характеристики.

Данные параметры необходимы для разработки структур солнечных элементов, поэтому существенным является измерение вольт-амперной характеристики с высокой точностью в естественных условиях окружающей среды.

Наиболее простой метод построения вольт-амперной характеристики солнечного элемента заключается в подключении к нему переменной резистивной нагрузки, в качестве которой может выступать потенциометр или магазин сопротивлений, и ступенчатое измерение напряжения и тока [5–8]. В процессе измерения последовательно переменной нагрузке включается токовый резистор (шунт) с известным сопротивлением, который позволяет определить генерируемый ток солнечным элементом в зависимости от сопротивления переменной нагрузки или интенсивности освещения. Обычно в качестве измерительных приборов используются лабораторные вольтметры, один из которых контролирует напряжение на солнечном элементе, а второй – напряжение на токовом резисторе. Недостатком данного метода является длительное время измерения вольт-амперной характеристики, при котором происходит продолжительное освещение солнечного элемента, что приводит к его нагреву и снижению точности получаемых фотоэлектрических параметров.

В данной работе представлен емкостной метод и на его основе разработано экспери-

ментальное устройство для автоматизированного измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов, которое позволяет повысить точность и равномерность измерения за счет снижения негативных внешних воздействий во времени, в частности нагрева солнечного элемента и нестабильности источника освещения.

Метод измерения

Емкостной метод измерения вольт-амперной характеристики солнечного элемента (панели) заключается в использовании в качестве переменной нагрузки емкости конденсатора. Принцип данного метода основывается на процессе зарядки конденсатора, который позволяет получить значения напряжения и тока вольт-амперной характеристики от режима короткого замыкания до режима холостого хода.

На рисунке 1 представлена эквивалентная электрическая схема солнечного элемента с емкостной нагрузкой и изменение тока и напряжения на конденсаторе в зависимости от времени при моделировании схемы в программе EveryCircuit. Данная электрическая схема содержит эквивалентную схему солнечного элемента, ключ, необходимый для зарядки от солнечного элемента и разрядки через резистор R_1 конденсатора, а также токовый резистор (шунт) R_2 (рис. 1а). При подключении солнечный элемент начинает заряжать изначально разряженный конденсатор до напряжения холостого хода (V_{oc}). При этом ток зарядки конденсатора изменяется в зависимости от изменения напряжения на конденсаторе во время процесса зарядки. Первоначальное значение тока равно току короткого замыкания ($I = I_{sc}$, $V \approx 0$) солнечного элемента, а по мере возрастания напряжения на выводах конденсатора значение тока уменьшается до нуля ($I \approx 0$, $V = V_{oc}$), когда конденсатор полностью заряжен (рис. 1б). Следовательно, после завершения процесса зарядки конденсатора можно построить вольт-амперную характеристику солнечного элемента.

Предполагая, что солнечный элемент (панель) имеет идеальную прямоугольную вольт-амперную характеристику ($FF = 1$), время зарядки конденсатора (t_c) зависит от его

емкости (C) и значений I_{sc} и V_{oc} согласно следующему выражению [8]:

$$t_C = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} C. \quad (2)$$

В реальных вольт-амперных характеристиках ток уменьшается с ростом напряжения ($FF < 1$), поэтому время зарядки конденсатора будет несколько превышать рассчитанное по выражению (2). При этом данного приближения более чем достаточно для определения емкости при разработке экспериментального устройства для автоматизированного измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов.

Для разрядки конденсатора перед началом проведения нового измерения необходим теплоотводящий резистор (R_1), который способен рассеивать мощность, накопленную в конденсаторе. Минимальное время (t_{zero}), необходимое для полной разрядки конденсатора, определяется из следующего выражения [8]:

$$t_{zero} \geq 5 \times R_1 \times C. \quad (3)$$

На основе емкостного метода разработана структурная схема экспериментального устройства для автоматизированного измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов (рис. 2).

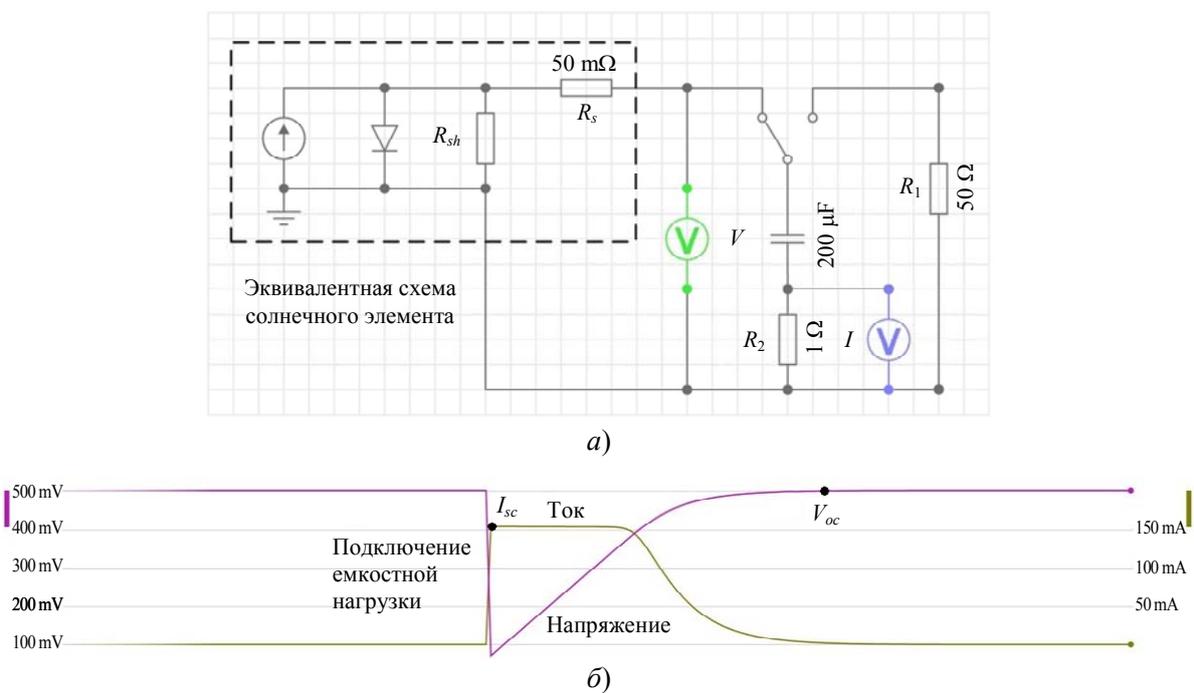


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема солнечного элемента с емкостной нагрузкой (а) и изменение тока и напряжения на конденсаторе в зависимости от времени (б)



Рис. 2. Структурная схема экспериментального устройства для измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов

Для поочередного подключения и отключения емкостной нагрузки (зарядки и разрядки конденсатора) от солнечного элемента было выбрано два быстродействующих твердотельных реле PVG612A с малой утечкой по току. В качестве емкостной нагрузки использовался электролитический конденсатор с ультранизким эквивалентным последовательным сопротивлением (ЭПС), что является необходимым для более точного измерения тока и напряжения при приближении к режиму короткого замыкания, когда $R_{load} \rightarrow 0$. Это делает разрабатываемое устройство более эффективным и обеспечивает улучшенные результаты для построения вольт-амперной характеристики солнечного элемента. Время построения вольт-амперной характеристики зависит от выбора номинальной емкости конденсатора, используемого в качестве нагрузки. При этом согласно выражению (2), чем выше значение емкости, тем больше времени занимает процесс зарядки конденсатора и соответственно тем больше значений тока и напряжения будет получено с помощью аналого-цифрового преобразователя для построения равномерной вольт-амперной характеристики. В данной работе для получения наиболее быстрой и точной вольт-амперной характеристики использовалась номинальная емкость 2200 мкФ (16 В), при которой время зарядки конденсатора составляет порядка 80 мс. Для разрядки конденсатора использовался резистор с номинальным сопротивлением 50 Ом, которому требуется примерно 0,5 сек., чтобы разрядить полностью заряженный конденсатор емкостью 2200 мкФ. Токовый резистор (шунт) с номинальным сопротивлением 1 Ом использовался для определения генерируемого тока солнечным элементом. Для усиления измеряемого напряжения с токового резистора использовался двухканальный операционный усилитель AD8626, обратная связь которого позволяет распределить значения измеренных напряжений на весь диапазон аналого-цифрового преобразователя. Для оцифровки измеренных электрических параметров использовался аналого-цифровой преобразователь AD7680 с поддержкой SPI протокола для связи с микроконтроллером. Микроконтроллер ATmega 328P связывается с компьютером для обработки и отображения полученных результатов от аналого-цифрового преобразова-

теля, а также управления твердотельными реле. Также для оцифровки, визуализации построения вольт-амперной характеристики и процесса зарядки конденсатора вместо аналого-цифрового преобразователя можно использовать осциллограф в режиме X-Y. Частота дискретизации измеряемой вольт-амперной характеристики может составлять десятки тысяч значений тока и напряжения (замеров) и ограничивается только возможностью измерительного прибора или используемым аналого-цифровым преобразователем в разрабатываемом устройстве.

Для освещения солнечного элемента применялся источник на основе галогеновой лампы с отражателем мощностью 150 Вт, спектр излучения которого максимально приближен к солнечному спектру AM1,5 [9]. Интенсивность освещения определялась с помощью датчика освещенности MAX44009.

Результаты и обсуждение

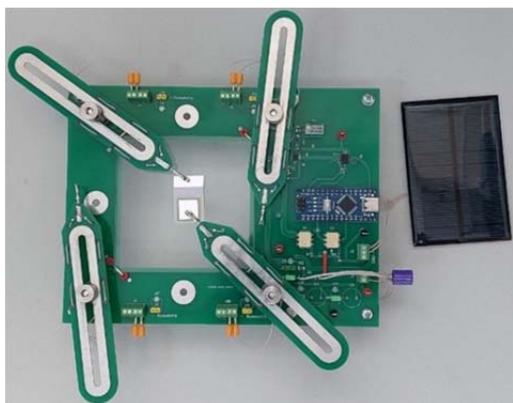
Для исследования возможностей емкостного метода и оценки точности измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов разработано экспериментальное устройство, разводка и 3D моделирование печатной платы которого осуществлялось в системе автоматизированного проектирования Diptrace. Для измерения вольт-амперной характеристики емкостным методом использовался тестовый поликристаллический кремниевый солнечный элемент площадью 50 см² с заявленной в спецификации максимальной мощностью 0,775 Вт, номинальными напряжением 5 В и током 155 мА при освещении стандартным спектром солнечного излучения AM1,5 (интенсивность 100 мВт/см², температура 25 °С) [9, 10].

На рисунке 3 представлен внешний вид разработанного экспериментального устройства на основе емкостного метода, пример измеренной вольт-амперной характеристики тестового солнечного элемента, а также изменение на осциллографе тока и напряжения на конденсаторе в зависимости от времени. Для экспериментальной визуализации построения вольт-амперной характеристики на основе процесса зарядки конденсатора использовался двухканальный цифровой осциллограф Rohde and Schwarz RTB2002 в ре-

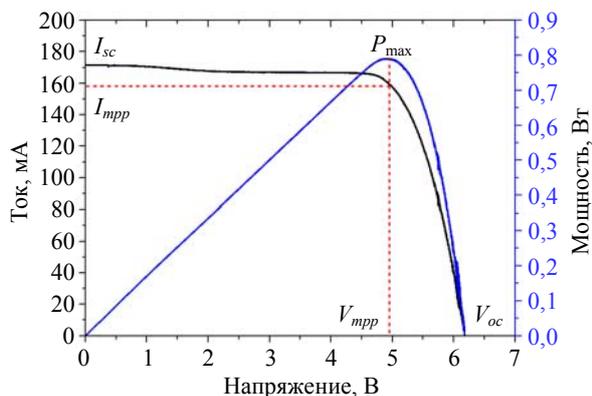
жиме X-Y. В данном режиме в левой части экрана осциллограф отображает вольт-амперную характеристику солнечного элемента, а в правой – зависимости изменения напряжения и тока при зарядке конденсатора (ёмкостной нагрузки) от солнечного элемента (рис. 3в).

Измерение вольт-амперной характеристики и определение фотоэлектрических па-

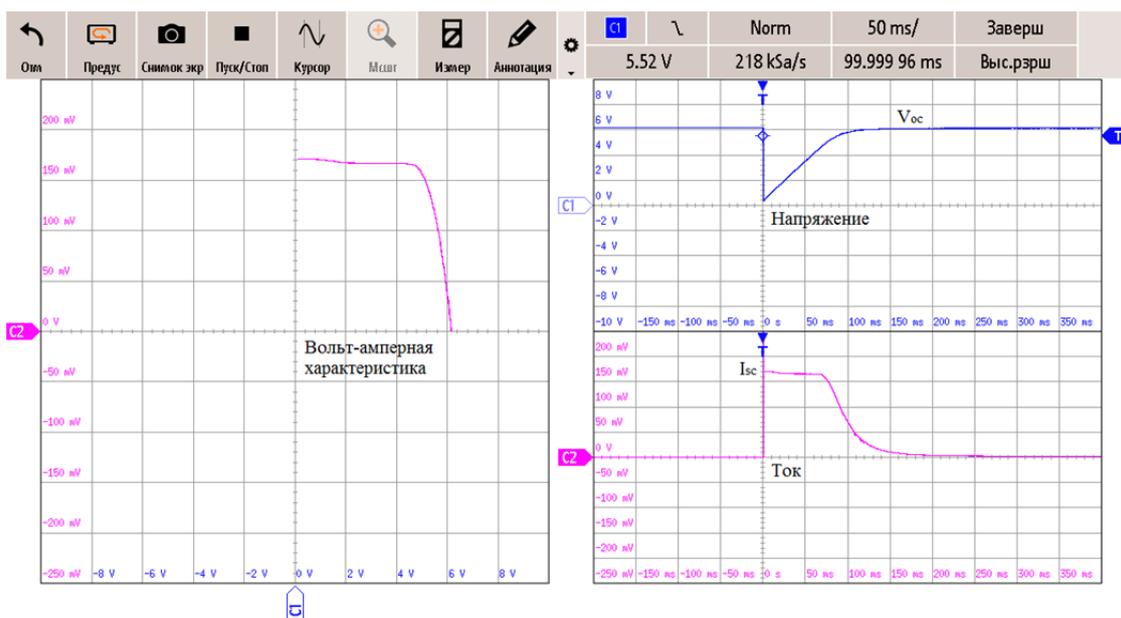
раметров тестового солнечного элемента осуществлялось последовательно пять раз для оценки точности измерения. В таблице приведены полученные фотоэлектрические параметры тестового солнечного элемента с использованием разработанного экспериментального устройства на основе ёмкостного метода.



а)



б)



в)

Рис. 3. Внешний вид разработанного экспериментального устройства (а), пример измеренной вольт-амперной характеристики (б) солнечного элемента с использованием цифрового осциллографа (в)

Таблица

Полученные параметры тестового поликристаллического солнечного элемента

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Максимальная мощность (Вт)	0,788	0,807	0,796	0,809	0,793
Номинальное напряжение (В)	4,977	4,978	4,953	4,981	4,946
Номинальный ток (мА)	158,4	162,1	160,7	162,4	160,3
Напряжение холостого хода (В)	6,171	6,172	6,169	6,174	6,168
Ток короткого замыкания (мА)	171,5	171,7	170,4	172,1	169,7

Частота дискретизации каждой измеренной вольт-амперной характеристики тестового солнечного элемента составила порядка 35000 значений тока и напряжения (замеров), построение которой по времени заняло около 170 мс. Реальное время зарядки конденсатора (t_c) является больше, чем расчетное, в частности из-за задержки переключения реле [8]. Погрешность измерения максимальной мощности солнечного элемента составила порядка 5 % по сравнению с заданными параметрами в спецификации, что подтверждает высокую точность представленного метода измерения и может быть связано с неоптимальным выбором параметров источника освещения.

Таким образом, емкостной метод позволяет измерить вольт-амперную характеристику солнечного элемента за миллисекунды, что значительно сокращает время измерения и повышает точность получаемых фотоэлектрических параметров.

Заключение

В работе представлен емкостной метод и разработано экспериментальное устройство для автоматизированного измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов. Основное преимущество данного метода заключается в скорости измерения вольт-амперной характеристики солнечного элемента, что позволяет повысить точность и равномерность измеряемых фотоэлектрических параметров за счет снижения негативных внешних воздействий во времени, в частности нагрева солнечного элемента и нестабильности источника освещения. Проведенные измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов с использованием разработанного экспериментального устройства показали, что погрешность полученных фотоэлектрических параметров по сравнению с заявленными в спецификации значениями со-

ставляет порядка 5 %, что подтверждает высокую точность емкостного метода измерения. Представленный метод может быть особенно интересен при разработке и изготовлении солнечных элементов с целью поиска оптимальных фотоэлектрических параметров, когда необходимо проводить измерения вольт-амперных характеристик большого количества солнечных элементов.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00827,
<https://rscf.ru/project/23-29-00827/>
в Южном федеральном университете.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Mustafa Q. Ali, Monaf S. Tapou, Hayder A. Dhahad / Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2021. Vol. 77. P. 132–150.
2. Saenko A. V., Bilyk G. E., Malyukov S. P. / St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16. P. 221–226.
3. Wang Xiao-qian, Luo Duan-bin / Physics Education. 2023. Vol. 58. P. 055021.
4. Augusto Andre, Killam Alexander, Bowden Stuart G., Wilterdink Harrison / Progress in Energy. 2022. Vol. 4. P. 042006.
5. Fernando Lessa Tofoli, Denis de Castro Pereira, Wesley Josias de Paula / International Journal of Photoenergy. 2015. Vol. 2015. P. 812582.
6. Shihskin V. A., Shishkin I. A., Shestakov D. A. / St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16. P. 362–367.
7. Коваль О. С., Тиванов М. С. / Вестник БГУ. Сер. 1. 2012. № 2. С. 39–44.
8. Javed K. Sayyad, Paresh S. Nasikkar / Applied Solar Energy. 2020. Vol. 56. P. 168–177.
9. Саенко А. В., Билык Г. Е., Малуков С. П. / Прикладная физика. 2023. № 4. С. 66–77.
10. Vedat Esen, Safak Saglam, Bulent Oral / Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 77. P. 1240–1250.

Development of an experimental device for automated measurement of current-voltage characteristics of solar cells

A. V. Saenko, G. E. Bilyk and V. V. Zheits

Southern Federal University
105/42 Bolshaya Sadovaya st., Rostov-on-Don, 344006, Russia
E-mail: avsaenko@sfnedu.ru

Received 16.07.2024; accepted

The paper presents the capacitive method and develops an experimental device for automated measurement of the current-voltage characteristics of solar cells. The method is to use a capacitor capacitance as a variable load to automate the measurement process. The main advantage of this method is the speed of measuring the current-voltage characteristics of a solar cell, which makes it possible to increase the accuracy and uniformity of the measured photovoltaic parameters by reducing negative external influences over time, in particular the heating of the solar cell and the instability of the lighting source. Measurements of the current-voltage characteristics of solar cells using the developed experimental device showed that the error of the obtained photoelectric parameters compared to the values stated in the specification is about 5 %, which confirms the high accuracy of the presented measurement method.

Keywords: solar cell, capacitive method, current-voltage characteristic, photoelectric parameters.

REFERENCES

1. Mustafa Q. Ali, Monaf S. Tapou and Hayder A. Dhahad, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences **77**, 132–150 (2021).
2. Saenko A. V., Bilyk G. E. and Malyukov S. P., St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics **16**, 221–226 (2023).
3. Xiao-qian Wang and Duan-bin Luo, Physics Education **58**, 055021 (2023).
4. Andre Augusto, Alexander Killam, Stuart G. Bowden and Harrison Wilterdink, Progress in Energy **4**, 042006 (2022).
5. Fernando Lessa Tofoli, Denis de Castro Pereira and Wesley Josias de Paula, International Journal of Photoenergy **2015**, 812582 (2015).
6. Shihskin V. A., Shishkin I. A. and Shestakov D. A., St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics **16**, 362–367 (2023).
7. Koval O. S. and Tivanov M. S., Vestnik BSU. Series 1. Physics. Mathematics. Computer Science **2**, 39–44 (2012).
8. Javed K. Sayyad and Paresh S. Nasikkar, Applied Solar Energy **56**, 168–177 (2020).
9. Saenko A. V., Bilyk G. E. and Malyukov S. P., Applied Physics **4**, 66–77 (2023) [in Russian].
10. Vedat Esen, Safak Saglam and Bulent Oral, Renewable and Sustainable Energy Reviews **77**, 1240–1250 (2017).