

УДК 681.586.732

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-121-129

## Моделирование работы фотоэлектрических систем с использованием программной среды Matlab

М. Н. Аль-Малики, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Л. М. Абдали, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Х. А. Исса, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

В. Н. Сяктерев, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Кувшинов, кандидат технических наук, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

*При работе фотоэлектрических систем большое количество преобразованной энергии по различным параметрам не участвует в электроснабжении потребителя. В результате снижается эффективность работы солнечных установок и надежность обеспечения электрической энергией. Это происходит по различным причинам, но прежде всего из-за несовершенной работы систем автоматического регулирования фотоэлектрических установок. Этими системами управляет информационное оборудование всей установки на основе программного обеспечения и алгоритмов управления. Несовершенство этих алгоритмов не позволяет в полной мере использовать солнечную генерацию фотоэлектрических панелей и ухудшает качество работы всего основного и вспомогательного оборудования электрогенерирующего комплекса. В представленной работе были проведены исследования, позволяющие улучшить работу системы солнечного электроснабжения и повысить ее надежность. Предложенные решения основывались на использовании новых методов отслеживания точки максимальной мощности с использованием высокотехнологичных алгоритмов для управления фотоэлектрической генерирующей системой. В данной работе была предложена обобщенная модель работы солнечного элемента Matlab-Simulink. Основой этой предлагаемой модели является простое математическое уравнение для имитации работы солнечного фотоэлектрического элемента, т. к. выходные характеристики фотоэлектрических модулей нелинейны. Выходные  $I-V$  и  $P-V$  свойства фотоэлектрического элемента зависят от температуры элемента и солнечной радиации. Физические характеристики конкретного солнечного фотоэлемента могут быть определены с помощью модели в зависимости от температуры и солнечного излучения. Многочисленные модели используют различные программные платформы, которые доступны в литературе. Эта имитационная модель очень проста и удобна в использовании. Результаты моделирования в Matlab-Simulink демонстрируют функциональность и динамическое поведение предоставленного солнечного модуля. На основе проведенного исследования было установлено, что предложенные алгоритмы позволяют значительно повысить эффективность работы фотоэлектрических установок с учетом использования новых методов управления. Генерируемая от преобразователей солнечной энергии мощность расходовалась более эффективно, а фотоэлектрическая система работала с высоким коэффициентом преобразования.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая панель, распределенная генерация, программная среда Matlab-Simulink, солнечная энергия, фотоэлектрический преобразователь.

### Введение

Экологические последствия использования традиционных источников негативно влияют на экологические проблемы, такие как загрязнение, глобальное потепление, последствия чрезмерного глобального потепления и другие проблемы, а также сокращение поставок нефти в энергетическую отрасль. Обеспечение устойчивой альтернативы стало очень важным и совпадает с ростом среднего потребления первичной энергии в последние годы (примерно до 78 БТЕ (АЕО

2012)). Самая большая проблема заключается в создании устойчивого будущего, которое зависит от интеграции и контроля возобновляемых источников энергии в распределенной генерации в сети. Распределенная генерация – это выработка энергии локально на уровне усилий по распределению с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии, таких как солнечные фотоэлектрические элементы, биогаз, энергия ветра и топливные элементы. Солнечная энергия является важным и широким источни-

ком возобновляемой энергии, и при надлежащем использовании она может обеспечить значительную часть мировых энергетических потребностей. Мировая потребность в энергии достигается за счет расширения исследований в области солнечной энергии, которая является основной частью возобновляемых источников энергии. Резкий рост цен на нефть делает солнечную энергию естественным жизнеспособным источником энергии с долгосрочными выгодами, хотя фотоэлектрическая система имеет высокую стоимость изготовления. Фотоэлектрический модуль является основным блоком преобразования энергии фотоэлектрической генераторной системы. Интенсивность солнечного излучения, температура модуля и выходное напряжение фотоэлектрического модуля являются основными переменными, от которых зависят рабочие характеристики фотоэлектрического модуля. Поскольку фотоэлектрический модуль обладает нелинейными характеристиками, важно смоделировать его для проектирования и моделирования отслеживания точки максимальной мощности (ТММ) для приложений фотоэлектрических систем. За последние четыре десятилетия были построены математические фотоэлектрические модели, используемые при моделировании. Все разработанные фотоэлектрические модели приблизительно описывают вольт-амперные и мощностные характеристики ( $V-I$  и  $P-V$ ), на которые в основном влияют солнечная инсоляция, напряжение нагрузки и температура модуля. Однако модели эквивалентных схем фотоэлектрических элементов реализованы на платформах моделирования силовой электроники, таких как Spice. В настоящее время при проектировании и разработке приложений силовой электроники появилось несколько мощных программных пакетов для моделирования электроники на основе компонентов. Однако трудно моделировать и изучать общее моделирование фотоэлектрических систем, поскольку нет фотоэлектрической модели для интеграции с существующей технологией моделирования электроники, а пакет Matlab-Simulink предлагает модели ветряных турбин. Соответственно, необходимо разработать обобщенную имитационную модель фотоэлектрических элементов, модулей и массивов в среде Matlab-Simulink. Эта предлагаемая общая модель построит кривую  $P-V$ , а также кривую  $V-I$  для любого вида материала и различных идеальных коэффициентов диода. Вот почему эту модель можно назвать обобщенной моделью построения кривой для фотоэлектрической системы.

**Целью исследования** является получение наиболее эффективного метода преобразования солнечной энергии и получение максимальной энергетической составляющей при работе фотоэлектрических установок. Он включает в себя анализ конструкции перспективного метода для точной и быстрой имитационной модели солнечной фотоэлектрической системы в сети и независимых систем, извлечения всех параметров фотоэлектрической установки, важных при проектировании.

#### **Фотоэлектрическая модель**

##### *Основы фотоэлектрического модуля*

Фотоэлектрический элемент – это полупроводниковый диод,  $p-n$ -переход которого подвергается воздействию света. Фотоэлектрический преобразователь изготовлен из нескольких типов полупроводниковых материалов с использованием различных технологий изготовления для снижения стоимости и повышения эффективности работы. Солнечный элемент состоит из легированной бором подложки  $P$ -типа, к которой атомы фосфора добавлены с использованием метода высокотемпературной диффузии для формирования  $p-n$ -перехода (рис. 1). На рынке представлены различные типы материалов для фотоэлектрических элементов, а именно: монокристаллический, поликристаллический и аморфный кремний, составные тонкопленочные материалы доступны для различных применений. Тонкопленочные солнечные элементы изготавливаются из  $CuInSe_2$ ,  $Cds$ ,  $CdTe$ ,  $Cu_2S$  и  $InP$ . Среди них солнечные элементы  $CuInSe_2$  обладают превосходной стабильностью. Заряды генерируются, когда энергия падающего фотона достаточна для разделения ковалентных электронов полупроводника. Это явление зависит от полупроводникового материала и длины волны падающего света, а на стыке создается потенциальный барьер для предотвращения перемещения носителей заряда, т. е. электроны и дырки. Появление света в ячейке приводит к образованию пар электронных дырок в области обеднения. Заряды генерируются, когда энергия падающего фотона достаточна для разделения ковалентных электронов полупроводника. Это явление зависит от полупроводникового материала и длины волны падающего света. На стыке электрона и дырок они разделяются в противоположных друг другу направлениях благодаря электрическому полю. На концах солнечного элемента собираются эти свободные носители. Если клемма элемента подключена к внешней нагрузке, электроны проходят через клемму элемента, подключенную к внешней

нагрузке, что является причиной тока в цепи. Солнечный элемент – это источник тока для подключенного внешнего источника питания.

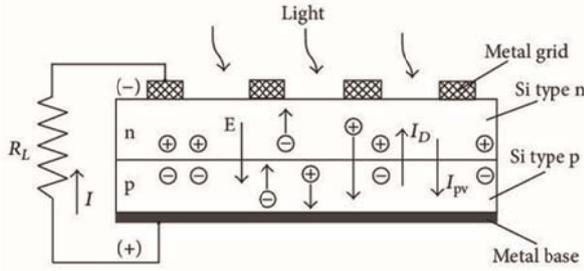


Рис. 1. Физическая структура солнечного элемента

Fig. 1. The physical structure of a solar cell

**Математическая модель фотоэлектрического модуля**

У нас есть простой доступ к математической модели в соответствии с физической моделью и выходной характеристикой солнечных элементов. Солнечный элемент представляет собой *p-n*-переход, часть которого аналогична характеристике диода. Различные параметры солнечного элемента моделируются следующим образом, см. рис. 2. Когда солнечный элемент освещен, электронно-дырочное движение приводит к возникновению электрических полей и фототока ( $I_L$ ). Источник тока генерирует фототок  $I_L$ , который пропорционален солнечному излучению. Этот ток ( $I_L$ ) продолжает протекать без приложенного извне напряжения, в результате этот ток называют током короткого замыкания ( $I_{sc}$ ).

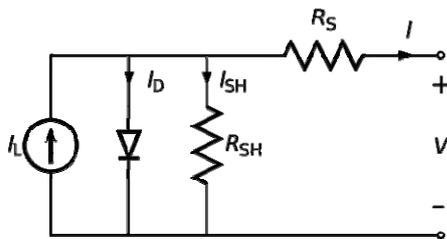


Рис. 2. Эквивалентная схема фотоэлектрического модуля

Fig. 2. PV Module Equivalent Circuit

Уравнения, описывающие вольт-амперные характеристики солнечного элемента, основаны на простой эквивалентной схеме на рис. 2 и приводятся ниже:

$$I_L = I_D + I_{SH} + I, \tag{1}$$

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{U(v+IR_s)}{KTA}} - 1 \right), \tag{2}$$

где  $I_0$  – ток насыщения ячейки.

Следовательно,

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{U(v+IR_s)}{KTA}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \tag{3}$$

где  $I$  – ток нагрузки, А;  $U$  является зарядом электрона =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  (эВ);  $K$  является постоянной Больцмана ( $j/K$ ) (i.e.  $1,38 \cdot 10^{-23} j/K$ );  $T$  – это температура ячейки, К;  $I_L$  представляет собой генерируемый светом ток, А;  $I_0$  является током насыщения диода, А;  $V$  является выходным напряжением ячейки, В;  $A$  – является ли это идеальным фактором в зависимости от фотоэлектрической технологии (2.5);  $R_{sh}$ ,  $R_s$  являются последовательностью ячеек и сопротивлением шунта  $\Omega$ .

Поскольку типичный солнечный элемент выдает менее 2 Вт при напряжении около 0,6 В, необходимо подключить элементы в модуле в конфигурации параллельного ряда. Фотоэлектрическая решетка представляет собой набор многочисленных солнечных модулей, которые электрически соединены последовательно и параллельно для получения необходимого тока и напряжения. На рис. 3 изображена эквивалентная схема солнечной панели, сконфигурированная параллельно  $N_p$  и последовательно  $N_s$ . Окончательное уравнение для тока и напряжения матрицы выглядит следующим образом.

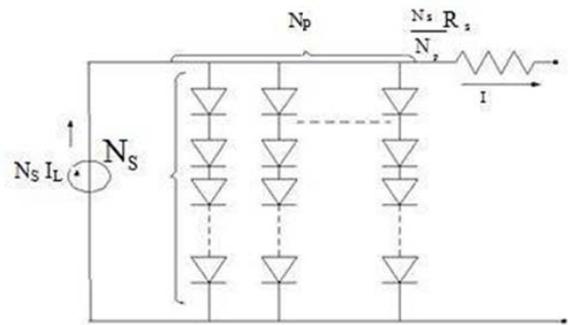


Рис. 3. Обобщенная модель модуля солнечной батареи

Fig. 3. Generalized model of the solar battery module

Теперь уравнение (3) может быть записано как

$$I = N_p I_L \left( e^{\frac{U(\frac{v}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p})}{KTA}} - 1 \right) - \frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p}. \tag{4}$$

Фотоэлектрическая эффективность чувствительна к небольшому изменению  $R_s$ , но нечувствительна к изменению  $R_{sh}$ . Для фотоэлектрического модуля последовательное сопротивление становится существенным, а сопротивление

шунтирования приближается к бесконечности, которая считается открытой. В большинстве коммерческих фотоэлектрических продуктов фотоэлементы обычно соединяются последовательно, образуя фотоэлектрический модуль для получения достаточного рабочего напряжения. Затем фотоэлектрические модули располагаются последовательно-параллельной структурой для достижения желаемой выходной мощности. Можно показать, что  $N_S = 1$  и  $N_P = 1$  для фотоэлемента, где  $N_P$  и  $N_S$  – порядковый номер ячеек для фотоэлектрического модуля, а  $N_S$  и  $N_P$  – последовательно-параллельный номер для фотоэлектрической матрицы. Математическое уравнение обобщенной модели может быть описано следующим образом:

$$I = N_P I_L \left( e^{\frac{U \left( \frac{1}{N_S} + \frac{I_{R_0}}{N_P} \right)}{KTA}} - 1 \right). \quad (5)$$

Наиболее упрощенная модель [6] обобщенного фотоэлектрического модуля показана на рис. 3 и описывается уравнением (5).

#### Влияние изменения солнечного излучения и температуры ячейки

Величина фототока  $I_L$  зависит от солнечной радиации и рабочей температуры элемента, которая обозначается

$$I_L = [I_{SC} + K_i (T - 298)] \frac{\beta}{1000}, \quad (6)$$

где  $I_{SC}$  является током короткого замыкания,  $A$ ;  $K_i$  – температурным коэффициентом тока короткого замыкания элемента (i.e.  $0.0017 \text{ A}/^\circ\text{C}$ );  $\beta$  – это солнечное излучение ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Напряжение разомкнутой цепи  $V_{oc}$  и ток короткого замыкания  $I_{SC}$  являются наиболее значимыми и часто используемыми показателями для определения электрических характеристик элемента. Из-за неявного характера и нелинейности вышеупомянутых уравнений сложно прийти к аналитическому решению для заданного набора параметров модели при заданной температуре и освещенности. Малые параметры диода и ток утечки на землю под контактом короткого замыкания обычно игнорируются, поскольку  $I_L \gg I_0$ . Таким образом, солнечный ток  $I_L$  и ток короткого замыкания  $I_{SC}$  почти одинаковы, т. е.

$$I_L = I_{SC}. \quad (7)$$

Ток насыщения ячейки  $I_0$  изменяется в зависимости от тока ячейки, который может быть связан приведенным ниже уравнением

$$I_0 = I_{rs} \left( \frac{T}{298} \right)^3 \left( e^{\frac{qE_G \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)}{KA}} \right), \quad (8)$$

где  $I_{rs}$  – являются ли ячейки обратным током насыщения при  $25^\circ\text{C}$ ;  $E_G$  является энергией запрещенной зоны полупроводника.

Однако параметр  $V_{oc}$  вычисляется при условии, что выходной ток равен нулю. Обратный ток насыщения при контрольной температуре можно приблизительно оценить, используя напряжение разомкнутой цепи фотоэлектрической системы  $V_{oc}$  при контрольной температуре и пренебрегая током утечки шунта.

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left( \frac{T}{298} \right)^3 \left( e^{\frac{qE_G \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)}{KA}} \right)}. \quad (9)$$

#### Построение и моделирование обобщенной фотоэлектрической модели

Общая модель солнечного элемента, встроенного в Matlab в среде Simulink в соответствии с уравнениями (3), (4) и (6)–(9), показана на рис. 4. На рис. 5 изображена подсистема фотоэлектрического модуля. Функциональные блоки для (8) и содержатся в этом блоке подсистемы (9). Окончательная модель фотоэлектрической системы создается путем соединения этих функционирующих компонентов здания. Эти уравнения используют две переменные – температуру и солнечное излучение – для представления эффектов каждой из них. Как можно заметить, напряжение разомкнутой цепи изменяется относительно незначительно, в то время как ток короткого замыкания и мощность увеличиваются с повышением уровня инсоляции. На рис. 8 показаны V-I и P-V свойства фотоэлектрической матрицы, обусловленные различными температурами элементов и уровнями солнечной радиации. Эти кривые из предложенной общей модели демонстрируют динамическое поведение солнечного модуля.

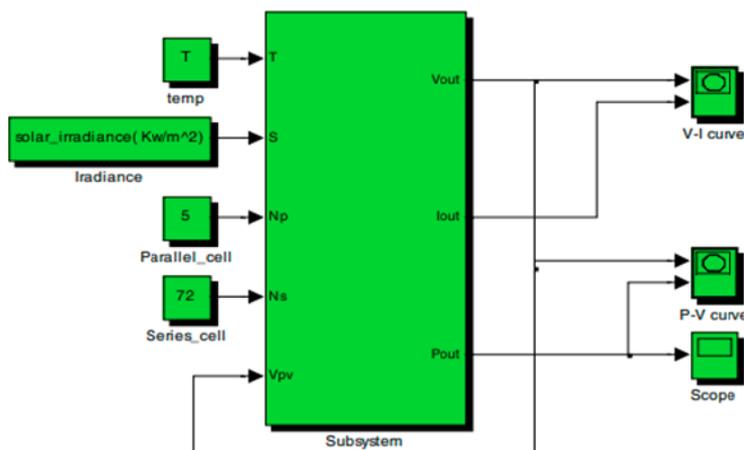


Рис. 4. Имитационная модель фотоэлектрической панели

Fig. 4. Disguised simulation model of a photovoltaic panel

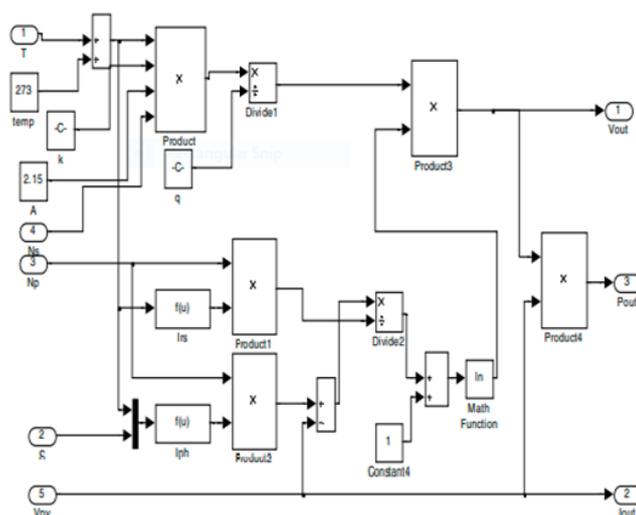


Рис. 5. Имитационная модель фотоэлектрической панели

Fig. 5. PV panel simulation model

Поскольку ток изменяется от тока короткого замыкания  $I_{sc}$  до 0 А, считается, что напряжение  $V$  изменяется от 0 до напряжения разомкнутой цепи  $V_{oc}$ . Кривые  $V-I$  и  $P-V$  показаны на рис. 6 и 7 соответственно, с использованием значений, указанных производителем, и с учетом колебаний уровня солнечной инсоляции при постоянной температуре ячейки 25 градусов.

Как можно заметить, напряжение разомкнутой цепи изменяется относительно незначительно, в то время как ток короткого замыкания и мощность увеличиваются с повышением уровня инсоляции. На рис. 8 показаны  $V-I$  и  $P-V$  свойства фотоэлектрической матрицы, обусловленные различными температурами элементов и уровнями солнечной радиации. Эти кривые из предложенной общей модели демонстрируют динамическое поведение солнечного модуля.

Например, модель NREL System Advisor используется для создания 128-элементного модуля SunPower. В таблице приведена информация о 128-элементном модуле SunPower, указанная производителем. Здесь NOCT обозначает номинальную рабочую температуру ячейки, которая составляет 25 °С при облучении 1000 Вт/м<sup>2</sup> и спектре AM 1,5.

#### Параметры 128-элементного модуля SunPower

##### SunPower 128 Cell Module Parameters

Параметр	Ценности
Ток короткого замыкания $I_{sc}$	5,92
Напряжение разомкнутой цепи	84,95
Максимальная мощность ( $P_{max}$ )	185 W
NOCT	42±2 % °C
$I_0$	2.29e-9 A
$N_P$	66
$N_S$	5

V/I характеристики солнечного элемента

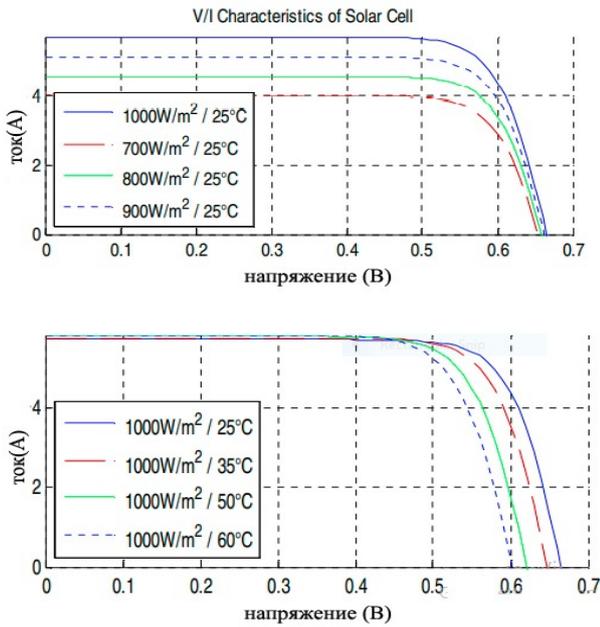


Рис. 6. Характеристики фотоэлемента для различных погодных условий

Fig. 6. Photocell characteristics for various weather conditions

Тип модуля: 128-элементный модуль SunPower

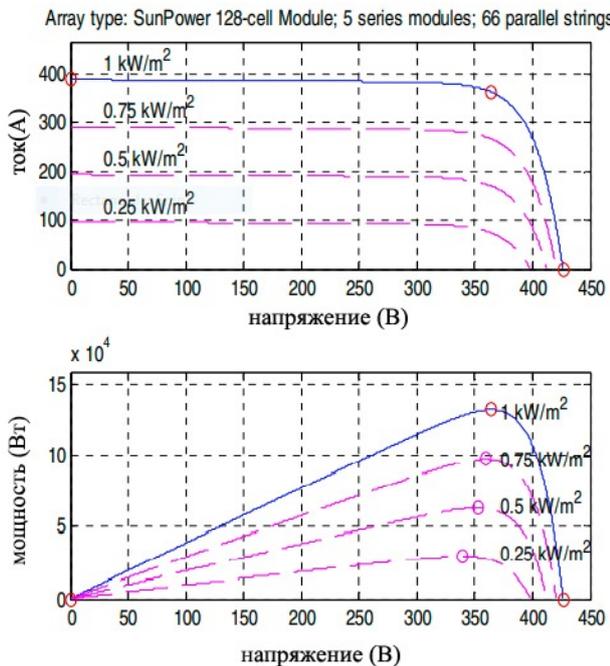


Рис. 7. Характеристики фотоэлектрической модели для различных уровней солнечного излучения

Fig. 7. Characteristics of the photovoltaic model for different levels of solar radiation

Тип массива: Модуль SunPower на 128 ячеек; 5 последовательных модулей; 66 параллельных строк

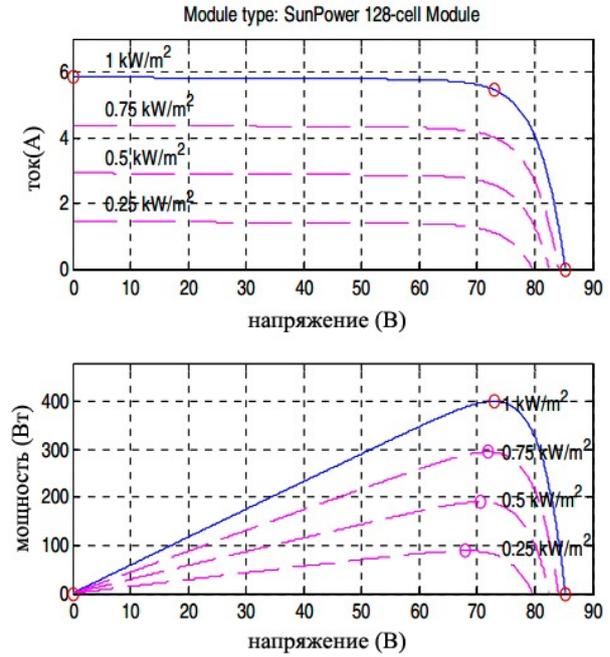


Рис. 8. Графики V-I и P-V для солнечной фотоэлектрической панели

Fig. 8. V-I & P-V curve of solar PV array

Заключение

На платформе Matlab-Simulink динамические свойства фотоэлектрического элемента, модуля и матрицы измеряются при различных значениях инсоляции и температуры элемента. Полученные результаты демонстрируют динамические свойства и эффективность солнечной системы с учетом изменений погоды, температуры и старения фотоэлементов. Обнаружено, что выходные характеристики модели Simulink соответствуют теоретическим характеристикам. Набор инструментов SimPower Systems Matlab/Simulink используется для исследования фотоэлектрических генераторов в контексте систем преобразования солнечной энергии, и предлагаемая модель очень проста и удобна в использовании. Разработчик силовой электроники может создать точную и быструю имитационную модель солнечной фотоэлектрической системы с акцентом на сетку и автономные системы, используя предлагаемый подход и имитационные модели для извлечения параметров фотоэлектрического модуля.

## Библиографические ссылки

1. Javed K.; Ashfaq H.; Singh R. A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy* 2020, 17, 48–61.
2. Pathak P. K., Padmanaban S., Yadav A. K., Alvi P. A., & Khan B. Modified incremental conductance MPPT algorithm for SPV-based grid-tied and stand-alone systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2022, 16(4), pp. 776–791.
3. Mehrjerdi H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 2020, 156, 183–192.
4. Shaw R. N., Walde P., & Ghosh A. IOT based MPPT for performance improvement of solar PV arrays operating under partial shade dispersion. In 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), 2020, pp. 1–4.
5. Abd Ali L. M., Al-Rufae F. M., Kuvshinov V. V. et al. Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
6. Darwesh M. R., & Ghoname M. S. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. *Energy Reports*, 2021, 7, pp. 1657–1671.
7. Использование метода отслеживания точки максимальной мощности для увеличения эффективности работы фотоэлектрических установок / Л. М. Абдали, М. Н. Аль-Малики, Х. А. Исса, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 4. С. 106–116. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116.
8. Zhang Q., Ning Xu., Ye Z. MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method. *Electric Engineering*, vol. 2, pp. 55–57, 2018.
9. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения / Л. М. Абдали, Х. А. Исса, М. Н. Аль-Малики, В. В. Кувшинов, Э. А. Бекиров // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25 (77). С. 75–85.
10. Belkaid A.; Colak I.; Kayisli K. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.* 2017, 99, pp. 839–846.
11. Abo-Elyousr F.K.; Abdelshafy A.M.; Abdelaziz A.Y. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 379–400.
12. Bhukya M. N., & Kota V. R. A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22 (3), pp. 869–884.
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. *Sol. Energy* 2018, 171, 593–603.
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, 12, 1451. Senol M., Abbasoglu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2019, 132, pp. 518–537.
15. H. Li, D. Yang, and W. Su, "An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 265–275, 2018.
16. Анализ различных методов отслеживания точки максимальной мощности при работе солнечных фотоэлектрических систем / Л. М. А. Абдали, Х. А. И. Исса, М. Н. К. Аль-Малики, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 3. С. 104–113. DOI 10.22213/2410-9304-2022-3-104-113.
17. Khatib, Tamer, and Wilfried Elmenreich. Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes. John Wiley & Sons, 2016.
18. Ram J. Prasanth T. Sudhakar Babu, and N. Rajasekar. "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, pp. 826–847.
19. Gheisarnejad, Meysam, Hamed Farsizadeh, and Mohammad Hassan Khooban. "A novel nonlinear deep reinforcement learning controller for DC–DC power buck converters." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68, no. 8 (2020): 6849–6858.
20. Banaei, Mohamad Reza, and Hossein Ajar Faeghi Bonab. "A high efficiency nonisolated buck–boost converter based on ZETA converter." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67, no. 3, pp. 1991–1998.
21. Pilakkat, Deepthi, and S. Kanthalakshmi. "An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions." *Solar Energy* 178, 2019, pp. 37–47.
22. Layth M. Abd Ali, L M., Ali, Q. A., Kláčková, I., Issa, H. A., Yakimovich, B. A. and Kuvshinov, V. (2021) Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*, Volume 26 (4), 773–783 DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>.
23. Mitrofanov S. V., Baykasenov D. K., & Suleev M. A. Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In 2018 International Ural Conference on Green Energy, IEEE, 2018, pp. 90–96.
24. El Mentaly, Lahcen, Abdellah Amghar, and Hassan Sahrah. "Comparison between HC, FOCV and TG MPPT algorithms for PV solar systems using buck converter." In 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), pp. 1–5. IEEE, 2017.

## References

1. Javed K.; Ashfaq H.; Singh R. A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy* 2020, 17, 48–61.
2. Pathak P. K., Padmanaban, S., Yadav, A. K., Alvi, P. A., & Khan, B. Modified incremental conductance MPPT algorithm for SPV-based grid-tied and stand-alone systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2022, 16 (4), pp. 776-791.
3. Mehrjerdi, H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 2020, 156, 183-192.
4. Shaw R. N., Walde P., & Ghosh A. IOT based MPPT for performance improvement of solar PV arrays operating under partial shade dispersion. In 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), 2020, pp. 1-4.
5. Abd Ali L. M., Al-Rufae F. M., Kuvshinov V. V. et al. Study of Hybrid Wind-Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
6. Darwesh M. R., & Ghoname M. S. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. *Energy Reports*, 2021, 7, pp. 1657-1671.
7. Abdali L.M., Al-Maliki M.N., Issa Kh.A., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Using the Maximum Power Point Tracking Method to Increase the Efficiency of Photovoltaic Installations]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 106-116 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116.
8. Q. Zhang, Xu. Ning, and Z. Ye, "MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method," *Electric Engineering*, vol. 2, pp. 55–57, 2018.
9. Abdali L.M., Issa H.A., Al-Maliki M.N., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. [Design and study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2022. No. 25. Pp. 75-85 (in Russ.).
10. Yin O.W. and B.C. Babu, Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions. *Optik*, 2018. 169: p. 48-61.
11. Abo-Elyousr, F.K.; Abdelshafy, A.M.; Abdelaziz, A.Y. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 379-400.
12. Bhukya, M. N., & Kota, V. R. A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(3), pp.869-884.
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. *Sol. Energy* 2018, 171, 593-603.
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, 12, 1451. Senol M., Abbasoglu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2019, 132, pp. 518-537.
15. H. Li, D. Yang, and W. Su, "An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 265-275, 2018.
16. Abdali L.M., Issa H. A., Аль-Малики М. Н., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Analysis Study and Comparison of Different Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic Systems] *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022. Vol. 20, no. 3. Pp. 104-113 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-3-104-113.
17. Khatib, Tamer, and Wilfried Elmenreich. Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes. John Wiley & Sons, 2016.
18. Ram, J. Prasanth, T. Sudhakar Babu, and N. Rajasekar. "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, pp. 826-847.
19. Gheisarnejad, Meysam, Hamed Farsizadeh, and Mohammad Hassan Khooban. A novel nonlinear deep reinforcement learning controller for DC-DC power buck converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68, no. 8 (2020): 6849-6858.
20. Banaei, Mohamad Reza, and Hossein Ajar Faeghi Bonab. "A high efficiency nonisolated buck-boost converter based on ZETA converter." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67, no. 3, pp. 1991-1998.
21. Pilakkat, Deepthi, and S. Kanthalakshmi. An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions. *Solar Energy* 178, 2019, pp. 37-47.
22. Layth M. Abd Ali, L M., Ali, Q. A., Klačková, I., Issa, H. A., Yakimovich, B. A. and Kuvshinov, V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*, 2021, Volume 26 (4), 773-783 DOI:<https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>
23. Mitrofanov, S. V., Baykasenov, D. K., & Suleev, M. A. Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In 2018 International Ural Conference on Green Energy, 2018? IEEE, pp. 90-96.
24. El Mentaly, Lahcen, Abdellah Amghar, and Hassan Sahah. Comparison between HC, FOCV and TG MPPT algorithms for PV solar systems using buck converter. In 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), pp. 1-5. IEEE, 2017.

**Analysis of Photovoltaic Systems Through Simulation and Design Using MATLAB**

*M. N. Al-Maliki*, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*L. M. Abdali*, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*H. A. Issa*, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*B. A. Yakimovich*, DSc in Engineering, Professor, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*V. N. Syakterev*, PhD in Engineering, Assoc. Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

*V. V. Kuvshinov*, PhD in Engineering, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*During the operation of photovoltaic systems, a large amount of converted energy, according to various parameters, does not participate in the consumer power supply. As a result, the efficiency of solar installations and the reliability of electric power supply are reduced. This happens for various reasons, but primarily due to the imperfect operation of automatic control systems for photovoltaic installations. These systems are controlled by the information equipment of the entire installation based on software and control algorithms. The imperfection of these algorithms does not allow the full use of solar generation of photovoltaic panels and degrades the quality of operation of all the main and auxiliary equipment of the power generating complex. In the presented work, studies were carried out to improve the operation of the solar power supply system and increase its reliability. The proposed solutions were based on the use of new methods for tracking the maximum power point using high-tech algorithms to control the photovoltaic generating system. In this paper, a generalized Matlab-Simulink solar cell operation model was proposed. The basis of the proposed model is a simple mathematical equation to simulate the operation of a solar photovoltaic cell, since the output characteristics of photovoltaic modules are non-linear. The output I-V and P-V properties of a photovoltaic cell depend on the temperature of the cell and solar radiation. The physical characteristics of a particular solar photovoltaic cell can be modeled as a function of temperature and solar radiation. Numerous models use various software platforms that are available in the literature. This simulation model is very simple and easy to use. Simulation results in Matlab Simulink demonstrate the functionality and dynamic behavior of the provided solar module. Based on the study, it was found that the proposed algorithms can significantly improve the efficiency of photovoltaic installations, taking into account the use of new control methods. The power generated from solar energy converters was used more efficiently, and the photovoltaic system operated at a high conversion rate.*

**Keywords:** photovoltaic panels, distributed generation, Matlab-simulink, solar energy, photovoltaic cell.

Получено: 10.04.23

**Образец цитирования**

Моделирование работы фотоэлектрических систем с использованием программной среды Matlab / М. Н. Аль-Малики, Л. М. Абдали, Х. А. Исса, Б. А. Якимович, В. Н. Сяктерев, В. В. Кувшинов // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 121–129. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-121-129.

**For Citation**

Al-Maliki M.N., Abdali L.M., Issa H.A., Yakimovich B.A., Syakterev V.N., Kuvshinov V.V. [Analysis of photovoltaic systems through simulation and design using Matlab]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 121-129 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-121-129.