

УДК 620.92

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-78-87

Моделирование режимов работы фотоэлектрической системы*

Л. М. Абдали, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Х. Д. Мохаммед, аспирант, Институт энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Институт ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

В. В. Кувшинов, кандидат технических наук, Институт ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Н. В. Коровкин, доктор технических наук, профессор, Институт энергетики Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Д. Ф. Бордан, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

При работе фотоэлектрических установок непостоянство энергетических характеристик потока падающей солнечной радиации отрицательно сказывается на генерации электрической энергии. Потребители сильно зависят от климатических факторов и солнечной инсоляции. Для более эффективной работы генерирующих солнечных установок необходимо проводить детальные исследования характеристик вспомогательного и контролирующего оборудования фотоэлектрической системы. При использовании математических программ для моделирования режимов работы солнечных энергетических генерирующих систем можно значительно улучшить рабочие параметры контролируемых блоков и вспомогательных систем и повысить выработку электрической энергии.

В работе приведена улучшенная электрическая схема фотоэлектрической генерирующей системы, ее контролируемых элементов, увеличена эффективность генерации энергии. Также описывается метод моделирования режимов работы фотоэлектрических (PV) модулей, реализованный в программе Matlab/Simulink. В работе было необходимо определить схемную имитационную модель для солнечной батареи, чтобы обеспечить взаимодействие с преобразователем мощности. Характеристики фотоэлементов, на которые влияют облучение и температура, моделируются схемной моделью. В качестве модели используется упрощенная схема замещения для PV-системы с диодным эквивалентом. Результаты моделирования сравниваются с различными типами данных фотоэлектрических модулей. В результате работы было показано, что созданные блоки симуляции в системе Matlab/Simulink хорошо имитируют работу солнечных батарей, при этом они совместимы с разными типами фотоэлектрических модулей и удобны в обеспечении различных режимов работы. При исследовании реальных режимов работы предложенной генерирующей системы была показана возможность увеличения выработки электрической энергии. При использовании предложенных схемных решений для работы солнечных установок можно значительно поднять их эффективность, продлить безаварийность работы, увеличить срок службы оборудования.

Проведенные исследования способствуют более качественному использованию блоков фотоэлектрических систем, применяемых для обеспечения электрической энергией промышленных, коммунальных и индивидуальных потребителей. Предложенные в работе схемные решения возможны к применению как на крупных солнечных электростанциях, работающих параллельно с общей энергетической системой, так и на малых фотоэлектрических установках, используемых для обеспечения индивидуальных потребителей.

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотоэлектрическая ячейка, фотоэлектрический модуль, Simulink, умная сеть электроснабжения.

Введение

Среди различных возобновляемых источников энергии преобразование энергии с помощью фотоэлектрического (PV) эффекта является наиболее важным и устойчивым способом из-за большого коли-

чества потока падающей солнечной радиации на поверхность Земли. Несмотря на кратковременность солнечного сияния, эта энергия широкодоступна в дневное время и является бесплатной для использования [1]. В последнее время фотоэлектрическая система признана

© Абдали Л. М., Мохаммед Х. Д., Якимович Б. А., Кувшинов В. В., Коровкин Н. В., Бордан Д. Ф., 2021

* Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» № 27/06–31.

ведущей в производстве возобновляемой электроэнергии, поскольку она может генерировать электроэнергию постоянного тока без сильных воздействий на окружающую среду и вредных загрязнений [2].

Из-за истощения запасов ископаемого топлива и растущего эффекта глобального потепления альтернативные источники энергии становятся популярными. Наибольшее внимание альтернативных энергий уделяется солнечной энергии. Существует два типа технологий, в которых используется солнечная энергия, а именно: солнечная тепловая батарея и фотоэлектрические системы. Солнечный элемент (полупроводниковый фотоэлемент) преобразует солнечный свет в электрическую энергию с помощью фотоэлектрического эффекта. Энергия от фотоэлектрических модулей обладает несколькими преимуществами, такими как минимальное техническое обслуживание и отсутствие загрязнения окружающей среды (см., например, «Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветроэлектрических установок». DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-102-112). В последнее время фотоэлектрические матрицы используются во многих устройствах, таких как зарядные устройства для батарей, системы накачки воды на солнечной энергии, фотоэлектрические системы, подключенные к сети, гибридные солнечные батареи и спутниковые системы питания [3].

Фотоэлектрический модуль представляет собой основной блок преобразования мощности фотоэлектрической генераторной системы. Выходная характеристика фотоэлектрического модуля зависит от солнечной инсоляции и температуры элемента. Поскольку фотоэлектрический модуль имеет нелинейные характеристики, необходимо моделировать режимы его работы для проектирования и моделирования максимальной мощности, отслеживание точек (ММТ) для приложений PV системы [4]. Фотоэлектрический модуль обычно состоит из ряда фотоэлементов, включенных последовательно. Обычный метод моделирования фотоэлемента – изучение физики $p-n$ -перехода [5]. Фотоэлемент имеет нелинейную характеристику напряжение-ток ($V-I$), которая может быть смоделирована с использованием источников тока, диода (R_D) и резисторов. Установки с одним и двумя диодами широко используются для моделирования характеристик фотоэлектрических систем. Установка с одним диодом справедливо и точно имитирует характеристики фотоэлектрической системы. Производитель предоставляет информацию об электрических характеристиках PV-

системы, указывая определенные точки в его вольтамперных характеристиках ($V-I$), которые называются замечательными точками [6–8].

Предложена упрощенная схема замещения PV-системы с использованием диодного эквивалента в качестве модели. Основным вкладом этой работы является реализация обобщенной модели PV-системы в форме маскированного блока, который имеет удобный для пользователя значок и диалог аналогично библиотекам блоков Matlab/Simulink.

Цель исследования – увеличение эффективности работы фотоэлектрической системы за счет использования более качественной компоновочной схемы, включающей специальные контролируемые устройства, позволяющие значительно увеличить выработку электрической энергии солнечной энергетической установкой.

Математическая модель для фотоэлектрической системы

На рисунке 1, $a-b$ представлены модели, наиболее часто используемые для имитации работы фотоэлемента: источник тока, параллельный одному или двум диодам [9]. Модель с одним диодом имеет четыре компонента: источник фототока, диод, параллельный источнику, ряд резисторов R_s и шунтирующий резистор R_{sh} . На рисунке 1, b представлена модель с двумя диодами, дополнительный диод – для лучшей подгонки кривой [10].

Сопrotивление шунта R_{sh} велико, поэтому им обычно можно пренебречь [11]. Таким образом, четыре параметрические модели (рис. 1, $a-b$) могут быть упрощены до рисунка 1 с упрощенной моделью эквивалентной схемы (Study of Hybrid Wind - Solar Systems for the Iraq Energy Complex. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>), [12].

Выходное напряжение V и ток нагрузки I соотносятся как

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где I_L – световой ток, А; I_0 – ток насыщения, А; I – ток нагрузки, А; V – выходное напряжение, В; R_s – последовательное сопротивление, Ω ; α – коэффициент завершения измерения теплового напряжения, В.

Четыре параметра (I_L , I_0 , R_s и α) должны быть определены для получения отношения I/V (причина, по которой модель называется четырехпараметрической моделью). Эквивалентная схема и уравнение (1) маскируют сложность фактической модели, поскольку четыре пара-

метра являются функциями температуры, тока нагрузки и/или солнечного излучения. Процедуры определения четырех параметров приведены

ниже (Моделирование и контроль энергии ветра / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Х. А. Исса, Х. Д. Мохаммед, Б. А. Якимович), [13, 14].

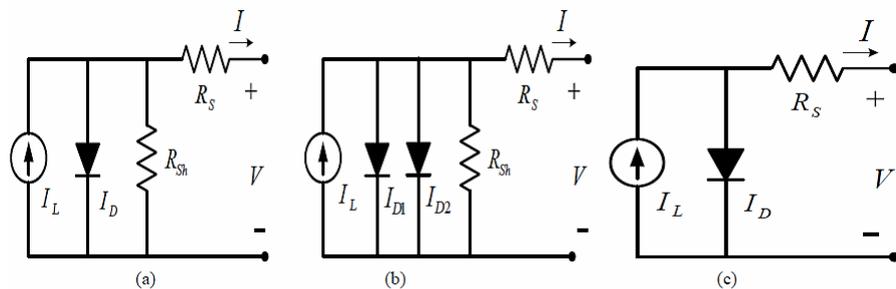


Рис. 1. Модели с эквивалентной схемой PV-ячейки: *a* – модель с одним диодом; *b* – модель с двумя диодами; *c* – упрощенная эквивалентная схема PV-системы

Fig. 1. The equivalent circuit of the PV cell models: *a* – the model of single diode; *b* – the model of dual diode; *c* – the PV equivalent diagram simplification

Световой ток I_L можно рассчитать как

$$I_L = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \left[I_{L,ref} + \mu_{I,SC} (T_C - T_{C,ref}) \right], \quad (2)$$

где Φ – освещенность, Вт/м²; Φ_{ref} – контрольная освещенность (в данном исследовании используется 1000 Вт / м²); $I_{L,ref}$ – световой ток в стандартных условиях (1000 Вт / м² и 25 °С); T_C – температура фотоэлемента, °С; $T_{C,ref}$ – контрольная температура (в данном исследовании используется 25 °С); $\mu_{I,SC}$ – температурный коэффициент тока короткого замыкания, А / °С; $I_{L,ref}$ и $\mu_{I,SC}$ доступны в техническом описании производителя.

Ток насыщения I_0 может быть выражен через его значение в стандартных условиях (Моделирование параметров управления интегрированной системой солнечной генерации и накопления энергии. DOI: 10.37279/2413-1873-2020-18133-142):

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_{C,ref} + 273}{T_C + 273} \right)^3 \times \exp \left[\frac{e_{gap} N_s}{q \alpha_{ref}} \left(1 - \frac{T_{C,ref} + 273}{T_C + 273} \right) \right], \quad (3)$$

где $I_{0,ref}$ – ток насыщения в стандартных условиях, А; e_{gap} – ширина запрещенной зоны материала (1,17 эВ для кремния); N_s – количество ячеек в серии фотоэлектрического модуля; q – заряд электрона ($1,60217733 \cdot 10^{-19}$ С); α_{ref} – значение в стандартных условиях.

$I_{0,ref}$ можно рассчитать как

$$I_{0,ref} = I_{L,ref} \exp \left(- \frac{V_{OC,ref}}{\alpha_{ref}} \right), \quad (4)$$

где $V_{oc,ref}$ – напряжение холостого хода, V, эталонного состояния PV-модуля, оценивается производителем при условиях, приведенных в [15–17].

Система точки максимальной мощности

Выходная мощность солнечного фотоэлектрического модуля изменяется в соответствии с движением Солнца, изменением уровня солнечной инсоляции и изменением температуры. Кроме того, в фотоэлектрических характеристиках фотоэлектрического модуля есть единственная максимальная точка мощности для конкретного рабочего состояния. Желательно, чтобы фотоэлектрический модуль работал близко к этой точке, то есть выход фотоэлектрического модуля приближался к точке максимальной мощности (ТММ). Процесс работы фотоэлектрического модуля в этом состоянии называется отслеживанием ТММ. Максимальное использование фотоэлектрической мощности улучшает использование солнечного фотоэлектрического модуля. Многие алгоритмы ТММ были предложены в прошлом. Сравнения между ними включены в работы, представленные в [18]. Алгоритм Р&О обеспечивает оптимальную работу системы в различных условиях. На рисунке 2 показан предлагаемый алгоритм ТММ управления мощностью PV. Целью алгоритма ТММ является автоматический поиск максимального рабочего напряжения и максимального рабочего тока, при которых фотоэлектрический модуль

может работать при максимальной мощности при заданных условиях освещенности и температуры.

Алгоритм Perturb and Observe (P&O) ТММ начинается с расчета выходной мощности фотоэлектрических модулей и ее изменения путем измерения как тока, так и напряжения фотоэлектрического модуля. Метод ТММ в этом случае периодически отслеживает приращение или уменьшение напряжения солнечного фотоэлектрического модуля. Если такое возмущение генерируется в том же направлении и если оно приводит к снижению мощности фотоэлектрического модуля, то возмущение генерируется

в противоположном направлении. Рабочий цикл изменяется до тех пор, пока не будет получено ТММ, однако система колеблется вокруг точки ТММ, уменьшая размер шага возмущения, уменьшает колебание, но замедляет его отслеживание [19].

Примеры моделирования PV-модуля

Параметры модуля были в значительной степени настроены в соответствии с РWХ 500 спецификации для солнечной радиации (1000 Вт/м²) и температура ячейки 25 °С. Настройки параметров перечислены в таблице [20].

Реализация всей системы в Matlab/Simulink показана на рисунке 3.

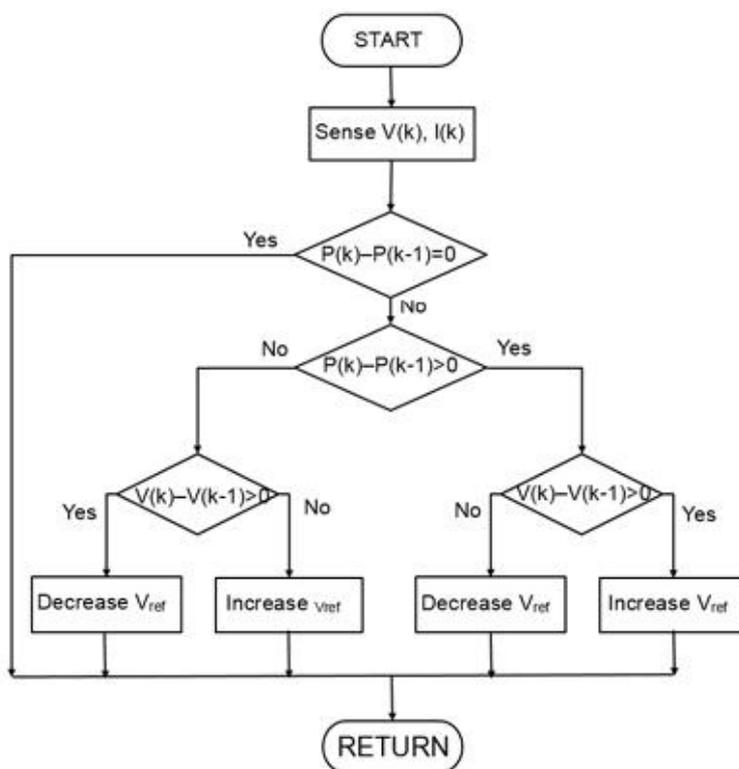


Рис. 2. Блок-схема метода ТММ (P&O)

Fig. 2. Block diagram of the MPPT method (P&O)

Параметры параметров, используемых для PV-модуля в моделировании

Parameters parameters used for PV module in simulation

| Параметры модуля | Ценности |
|--|----------------------------------|
| Максимальная мощность, P_{max} | 49 Вт |
| Максимальное напряжение питания, V_{mp} | 17 В |
| Максимальный ток питания, I_{mp} | 2,9 А |
| Температурный коэффициент для I_{sc} , KI | $(0,065 \pm 0,015) \% / C^\circ$ |
| Температурный коэффициент для V_{oc} , KV | $-(80 \pm 10)mV / C^\circ$ |
| Ток короткого замыкания, I_{sc} | 3,11 А |
| Напряжение холостого хода, V_{oc} | 21,8 В |
| Последовательное сопротивление, R_s | 0,55 Ом |
| Число последовательно соединенных ячеек, N_s | 36 |

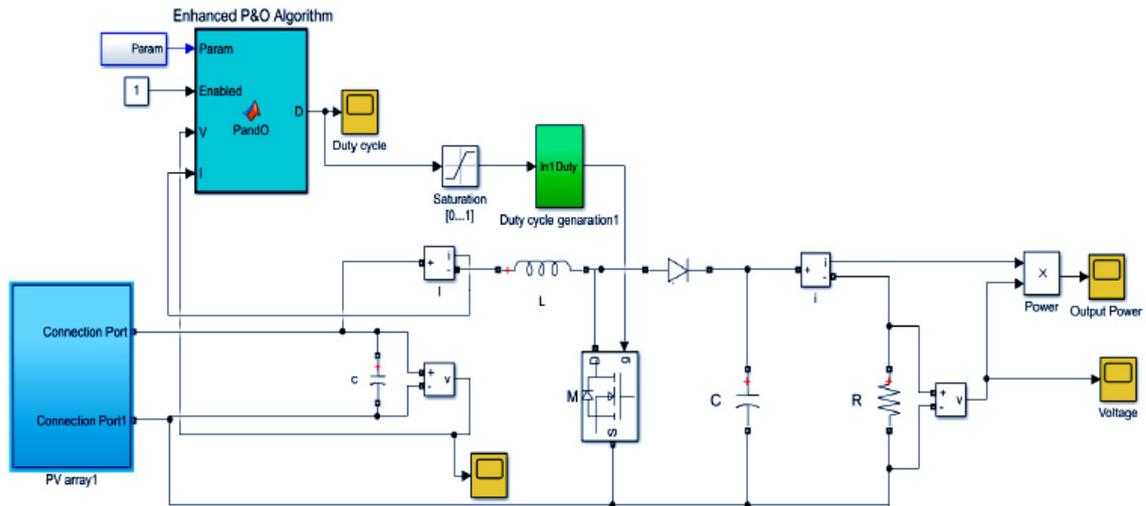


Рис. 3. Модель Simulink предлагаемой фотоэлектрической системы

Fig. 3. The Simulink's Model of the proposed photovoltaic system

Результаты моделирования испытания на постоянную резистивную нагрузку

На рисунке 4 показано моделирование предлагаемого фотоэлектрического модуля, подключенного к резистивной нагрузке постоянного тока. Нагрузочный резистор R_L был установлен на 4,6 Ом для работы точки максимальной мощности (ТММ). При моделировании были использованы оптимальное излучение R (1000 Вт/м²) и температура модуля (T_c) 26 °С. Внутренний резистор R_i и конденсатор C_i были установлены, соответственно, на 1 Ом и 10^{-2} Ф.

Переходная характеристика фотоэлектрического модуля, когда он подключен к резистивной нагрузке, показана на рисунке 5, *a*, *b*.

Напряжение и ток нагрузки устанавливаются на постоянные значения примерно через 0,05 секунды переходного режима. Расчетное время может быть с поправкой на C_i и R_i . Регулировка переходного отклика PV-модуля, в частности,

полезна для анализа напряжения и стабильности мощности энергосистемы, питаемой от фотоэлектрических панелей. Мощность, подаваемая на нагрузку фотоэлектрическим модулем, была достигнута в установившемся режиме после разработки переходного режима, что позволяет более реалистично анализировать работу фотоэлектрической панели при моделировании энергосистемы.

Рисунок 6, *a*, *b*, демонстрирует ввод мощности фотоэлектрического модуля для различных значений нагрузки и напряжений нагрузки, где *a* обозначает точку максимальной мощности, отслеживаемую при сопротивлении нагрузки 4,6 Ом, а *b* показывает, что точка максимальной мощности отслеживается при напряжении нагрузки 14,5 В. ТММ указывают пределы мощности фотоэлектрических модулей. Это очень полезно для тестирования методом отслеживания ТММ в Matlab/Simulink.

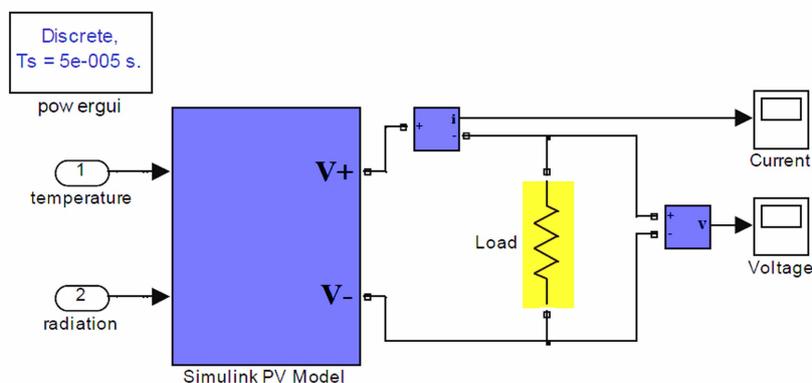


Рис. 4. Моделирование PV-модуля для нагрузки постоянного тока

Fig. 4. Implementation of the emulation for the load of the PV plant

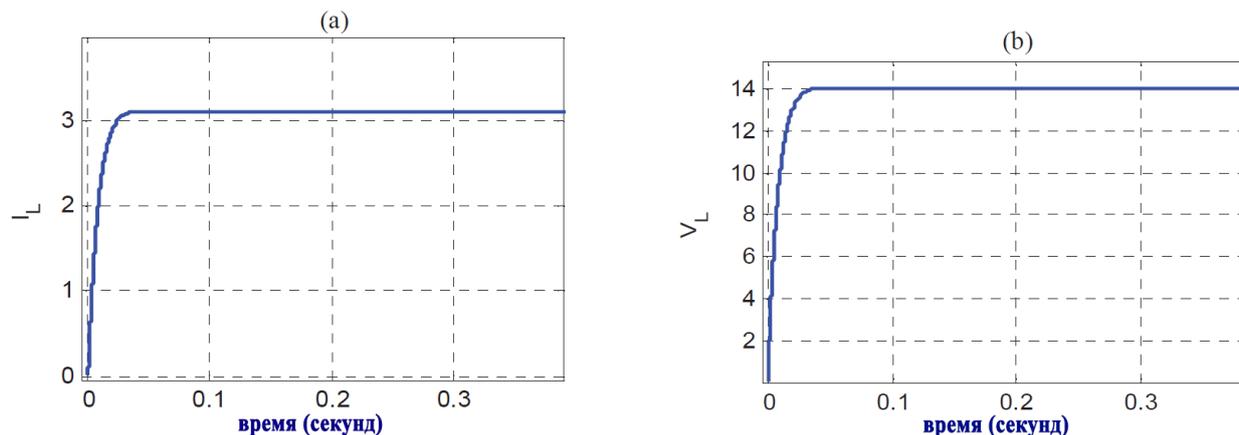


Рис. 5. Ток, А, и напряжение, V (a); мощность, W, фотоэлектрического модуля для сопротивления нагрузке 4,6 Ом (b)

Fig. 5. The voltage and the current (a); the energy for the load resistance of 4.6 in the photovoltaic plant (b)

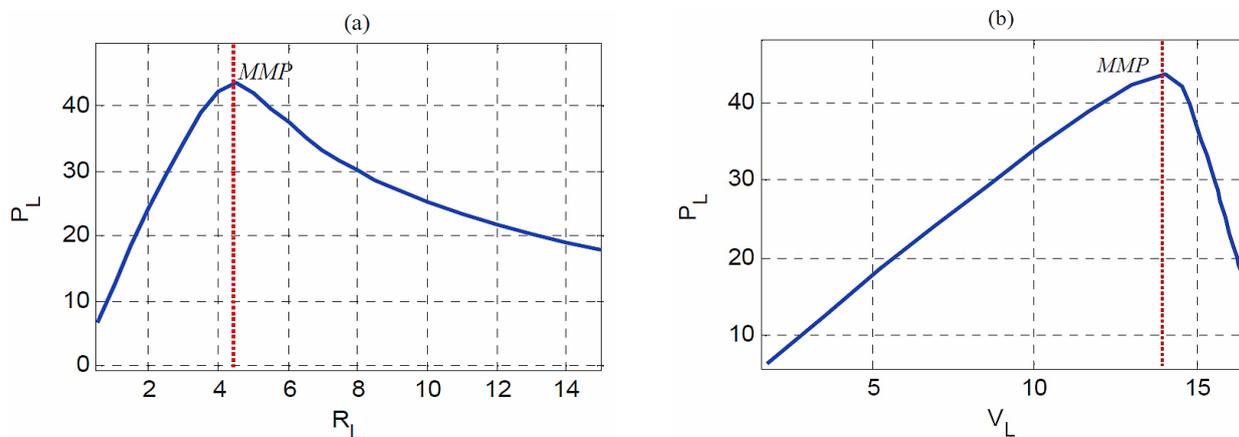


Рис. 6. Ввод мощности в зависимости от характеристик сопротивления нагрузки (a); ввод мощности в зависимости от характеристик напряжения нагрузки (b)

Fig. 6. The relationship between power input and the load resistance's properties (a); represent the relationship between power input and the characteristics of the load voltage (b)

Солнечная энергия для трехфазного моделирования распределения мощности переменного тока

Моделирование фотоэлектрической матрицы, питающей трехфазную систему распределения переменного тока, показано на рисунке 7. Преобразователь постоянного тока в переменный с импульсным инвертором с тремя модулями вызывает нестабильность постоянного тока из-за периодического переключения тока фотоэлектрического модуля. Чтобы уменьшить негативное влияние возможного обратного тока преобразователя постоянного тока в переменный ток, используется диод. Выход фотоэлектрического модуля подключен к преобразователю постоянного тока в переменный ток для подачи резистивной нагрузки 1000 Вт на фазу. Чтобы получить достаточную мощность от фотоэлектрического модуля было настроено 10 номе-

ров последовательных и 5 чисел структуры параллельных ячеек ($N_{sc} = 10$ и $N_{pc} = 5$).

На рисунке 8, a, b, показано напряжение постоянного тока, V_p , подаваемое от фотоэлектрического модуля, и средняя величина мощности, P_L , потребляемой от фотоэлектрического модуля. На рисунке 8, c, показана линия к переменному напряжению нейтралу, измеренная от резистивных нагрузок. После переходного режима, продолжающегося 0,1 секунды, средняя мощность, потребляемая от фотоэлектрического модуля, переходит в устойчивый режим и устанавливается примерно на уровне 3000 Вт.

Эту PV-модель легко настроить для получения желаемых характеристик режимов работы PV-системы и напрямую подключить к электрической цепи энергосистемы для анализа переходных процессов.

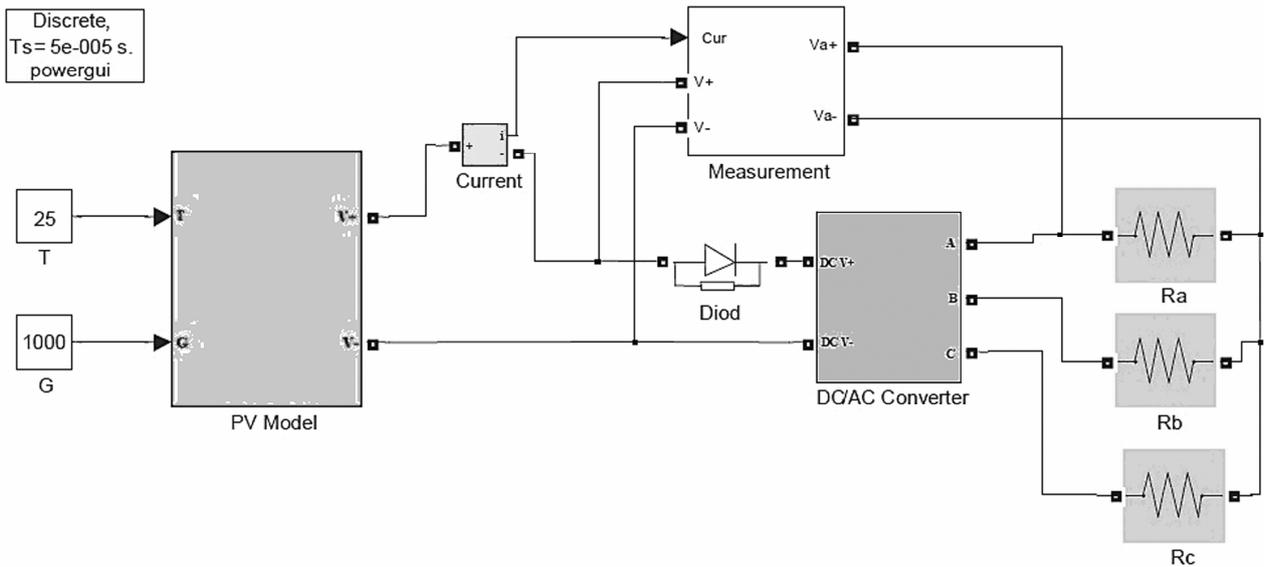


Рис. 7. Моделирование фотоэлектрической матрицы, обеспечивающей трехфазное распределение переменного тока

Fig. 7. The emulation of a PV array providing 3-phase AC distribution

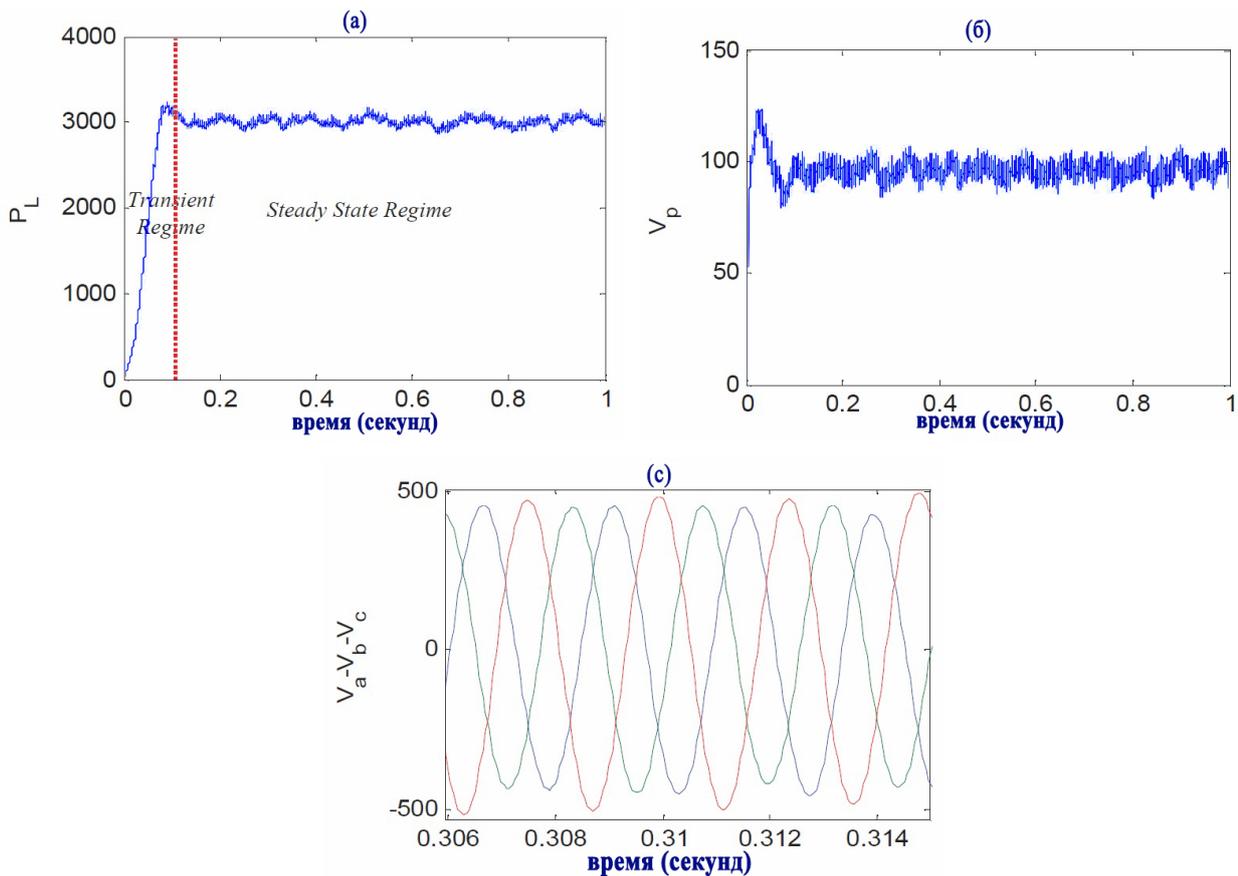


Рис. 8. Выходное напряжение, V_p , фотоэлектрического модуля (a); средняя величина мощности, P_L , подаваемой от фотоэлектрического модуля к преобразователю постоянного тока в переменный (b); трехфазная линия к нейтральному напряжению ($V_a-V_b-V_c$) (c)

Fig. 8. The voltage produces from the PV panel (a); the intermediate value of power supplied from the PV module to the converter (b); 3-Ph streak to epy voltage neutral shown (c)

Заключение

Работа фотоэлектрического модуля состоит из двух основных частей: поведенческой модели фотоэлементов и ограниченной по мощности электрическим драйвером для подключения цепи. Поведенческая модель оценивает напряжение и потенциал тока PV-панели для данных условий солнечного излучения и температуры модуля. Электрический драйвер с ограничением мощности обеспечивает соответствующий электрический отклик на нагрузку. Предложенный фотоэлектрический модуль может быть использован для анализа переходных процессов энергосистемы, снабженной фотоэлектрическими панелями, а также для тестирования методов отслеживания ТММ.

После анализа полученных результатов можно сказать, что предложенные схемные решения для фотоэлектрических системы повышают эффективность работы генерирующих установок и позволяют более полно преобразовывать поток падающей солнечной радиации в электрическую энергию. Использование предложенных устройств для контроля характеристик работы фотоэлектрических систем повышает их энергетические характеристики и увеличивает срок эксплуатации за счет более щадящих режимов генерации.

Внедрение предложенных устройств для работы фотоэлектрических систем позволяет выйти на более качественный уровень использования установок по прямому преобразованию солнечной энергии.

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, vol. 17, pp. 48-61.
2. Abo-Elyousr F.K., Abdelshafy A.M., Abdelaziz A.Y. TMMT-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.
3. 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.
4. Morlaye Sekou Camara, Mamadou Bailo Camara, Brayima Dakyo and Hamid Gualous. Permanent Magnet Synchronous Generator for Offshore Wind Energy System Connected to Grid and Battery - Modeling and Control Strategies. *International Journal of Renewable Energy*, Le Havre, France, 2015, 01-03.
5. Senol M., Abbasoğlu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2016, vol. 132, pp. 518-537.
6. Chatterjee A., Keyhani A., Kapoor D. Identification of Photovoltaic Source Models. *Energy Conversion, IEEE Transactions*, 2021, vol. PP, pp. 1-7.
7. Bana S., Saini R.P. A mathematical modeling framework to evaluate the performance of single diode and double diode based SPV systems. *Energy Reports*, 2016, no. 2, pp. 171-187.
8. Amiry H. Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 169, pp. 206-216.
9. Ibrahim H., Anani N. Variations of PV module parameters with irradiance and temperature. *Energy Procedia*, 2017, vol. 134, pp. 276-285.
10. 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.
11. Masmoudi F., Salem F., Derbel N. Single and double diode models for conventional mono-crystalline solar cell with extraction of internal parameters. In *13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 2016.
12. Belkaid A., Colak I., Kayisli K. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.*, 2017, vol. 99, pp. 839-846.
13. Yin O.W., Babu B.C. Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions. *Optik*, 2018, vol. 169, pp. 48-61.
14. Aurel Gontean, Septimiu Lica, Szilard Bularka, Roland Szabo, Dan Lasca. A Novel High Accuracy PV Cell Model Including Self Heating and Parameter Variation. *Energies*, 2018, 11:36.
15. Xuan Hieu Nguyen, Minh Phuong Nguyen. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. *Environmental Systems Research*, 2015, 4:24.
16. Belkaid A., Colak I., Kayisli K. Implementation of a modified P&O-TMPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.*, 2017, vol. 99, pp. 839-846.
17. Li H., Yang D., Su W. An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 265-275.
18. Fazal M.R., Kamran M., Haq I., Abbas Z., Ayyaz M.N., Mudassar M. Modified Perturb and Observe MPPT algorithm for partial shading conditions. *Int. J. Renew. Energy Res.*, 2019, vol. 9, pp. 721-731.
19. Pathy S., Subramani C., Sridhar R., Theentral T., Padmanaban S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems. *A Comparative Study Energies*, 2019, vol. 12, pp. 14-51.
20. Aouchiche N., Aitcheikh M.S., Becherif M., Ibrahim M.A. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach. *Sol. Energy*, 2018, vol. 171, pp. 593-603.

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, vol. 17, pp. 48-61.
2. Abo-Elyousr F.K., Abdelshafy A.M., Abdelaziz A.Y. TMMT-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.
3. 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.
4. Morlaye Sekou Camara, Mamadou Bailo Camara, Brayima Dakyo and Hamid Gualous. Permanent Magnet Synchronous Generator for Offshore Wind Energy System Connected to Grid and Battery - Modeling and Control Strategies. *International Journal of Renewable Energy*, Le Havre, France, 2015, 01-03.
5. Senol M., Abbasoglu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2016, vol. 132, pp. 518-537.
6. Chatterjee A., Keyhani A., Kapoor D. Identification of Photovoltaic Source Models. *Energy Conversion, IEEE Transactions*, 2021, vol. 26, pp. 1-7.
7. Bana S., Saini R.P. A mathematical modeling framework to evaluate the performance of single diode and double diode based SPV systems. *Energy Reports*, 2016, no. 2, pp. 171-187.
8. Amiry H. Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 169, pp. 206-216.
9. Ibrahim H., Anani N. Variations of PV module parameters with irradiance and temperature. *Energy Procedia*, 2017, vol. 134, pp. 276-285.
10. 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.
11. Masmoudi F., Salem F., Derbel N. Single and double diode models for conventional mono-crystalline solar cell with extraction of internal parameters. In *13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 2016.
12. Belkaid A., Colak I., Kayisli K. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.*, 2017, vol. 99, pp. 839-846.
13. Yin O.W., Babu B.C. Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions. *Optik*, 2018, vol. 169, pp. 48-61.
14. Aurel Gontean, Septimiu Lica, Szilard Bularka, Roland Szabo, Dan Lascu. A Novel High Accuracy PV Cell Model Including Self Heating and Parameter Variation. *Energies*, 2018, 11:36.
15. Xuan Hieu Nguyen, Minh Phuong Nguyen. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. *Environmental Systems Research*, 2015, 4:24.
16. Belkaid A., Colak I., Kayisli K. Implementation of a modified P&O-TMMT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.*, 2017, vol. 99, pp. 839-846.
17. Li H., Yang D., Su W. An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 265-275.
18. Fazal M.R., Kamran M., Haq I., Abbas Z., Ayyaz M.N., Mudassar M. Modified Perturb and Observe MPPT algorithm for partial shading conditions. *Int. J. Renew. Energy Res.*, 2019, vol. 9, pp. 721-731.
19. 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. 14-51.
20. 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, vol. 171, pp. 593-603.

Modeling the Operating Modes of a Photovoltaic System

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

H.J. Mohammed, Post-graduate, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

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

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

N.V. Korovkin, DSc in Engineering, Professor, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

D.F. Bordan, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

During the operation of photovoltaic installations, the inconstancy of the energy characteristics of the flow of incident solar radiation adversely affects the generation of electrical energy. Consumers are highly dependent on climatic factors and solar insolation. For more efficient operation of generating solar installations, it is necessary to conduct

detailed studies of the characteristics of the auxiliary and control equipment of the photovoltaic system. When using mathematical programs to simulate the operating modes of solar power generating systems, it is possible to significantly improve the operating parameters of control units and auxiliary systems and increase the generation of electrical energy. The paper presents an improved electrical diagram of a photovoltaic generating system, its control elements, and the efficiency of energy generation is increased. It also describes a method for modeling the operating modes of photovoltaic (PV) modules, implemented in the Matlab/Simulink program. In the work, it was necessary to define a circuit simulation model for the solar array to ensure interaction with the power converter. The characteristics of the solar cells, which are influenced by irradiation and temperature, are modeled by a circuit model. A simplified equivalent circuit for a diode equivalent PV system is used as a model. The simulation results are compared with different types of PV module data. As a result of the work, it was shown that the created simulation blocks in the Matlab/Simulink system well simulate the operation of solar panels, while they are compatible with different types of photovoltaic modules and are convenient in providing various operating modes. In the study of real operating modes of the proposed generating system, the possibility of increasing the generation of electrical energy was shown. When using the proposed circuit solutions for the operation of solar installations, it is possible to significantly increase their efficiency, extend the trouble-free operation, and increase the service life of the equipment. The conducted research contributes to a better use of blocks of photovoltaic systems used to provide electrical energy to industrial, municipal and individual consumers. The circuit solutions proposed in the work are possible for use both at large solar power plants operating in parallel with the general energy system, and at small photovoltaic installations used to provide individual consumers.

Keywords: solar energy, photovoltaic cell, photovoltaic module, Simulink, smart power grid.

Получено 20.05.2021

Образец цитирования

Моделирование режимов работы фотоэлектрической системы / Л. М. Абдали, Х. Д. Мохаммед, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов, Н. В. Коровкин, Д. Ф. Бордан // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 3. С. 78–87. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-78-87.

For Citation

Abdali L.M., Mohammed H.J., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Korovkin N.V., Bordan D.F. [Modeling the Operating Modes of a Photovoltaic System]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 78-87 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-78-87.