

УДК: 621.311.243

ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ПРИ ЧАСТИЧНОМ ЗАТЕНЕНИИ НА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ¹

А. Г. Васьков (*vaskovag@mpei.ru*)

И. Н. Айнуллоева (*ainulloeva@mpei.ru*)
НИУ «МЭИ», Москва

В работе предложена математическая модель, описывающая неравномерное распределение температуры по поверхности солнечного фотоэлектрического модуля и позволяющая оценить изменение его эффективности в условиях частичного затенения.

Ключевые слова: математическая модель, фотоэлектрические модули, затенение, эффективность, библиотека PVLIB.

Введение

Эффективность фотоэлектрических модулей (ФЭМ) тесно связана с температурой их элементов. Широко применяемые математические модели учитывают лишь равномерный нагрев всех солнечных элементов. Однако частичное затенение фотоэлектрических модулей, часто возникающее при работе фотоэлектрических установок, который приводит к неравномерному нагреву поверхности фотоэлектрического модуля. В первом разделе работы приводится схема замещения фотоэлектрического модуля, дано описание рассматриваемого фотоэлектрического модуля и обосновывается принцип

¹ Работа проводилась в рамках проекта «Системы управления солнечно-дизельными комплексами» при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF-2022-0006).

проведения исследования. Второй раздел включает описание процесса моделирования фотоэлектрических модулей в среде PVLIB Python. В третьем разделе представлены результаты исследования.

Существует работы [2, 3] в которых анализировалось влияния частичного затенения на производительность фотоэлектрических модулей, основываясь на моделях одно- или двухдиодных схемах замещения фотоэлементов. Нововведением в данном исследовании является применение библиотеки PVLIB Python для моделирования влияния частичного затенения на изменение вольт-амперной характеристики фотоэлектрического модуля. Целью данного исследования является представление метода моделирования частичного затенения на платформе PVLIB Python, который может быть применен для других модулей с известными паспортными данными.

1. Математическое описание фотоэлектрических модулей

Фотоэлектрические элементы, соединенные вместе, образуют модуль или панель, а соединение одного или нескольких модулей называется массивом. Фотоэлектрический элемент — это полупроводниковый диод, в котором p-n переход подвергается воздействию света. [1]

В работе используется самая простая модель для описания фотоэлектрического модуля, модель идеального диода. Схема замещения [1] показана на рисунке 1.

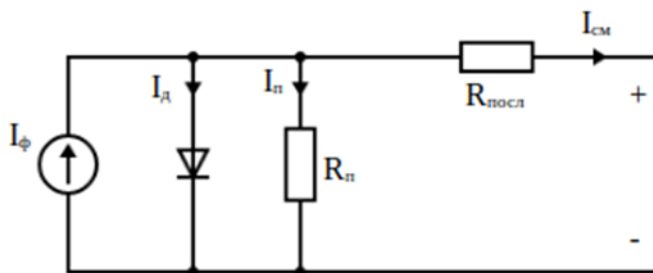


Рис.1. Схема замещения фотоэлектрического модуля

Уравнение 1.1 описывает вольт-амперную характеристику фотоэлектрического преобразователя.

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[\exp\left(\frac{U}{aN_{\text{яч}}U_{\text{яч}}}\right) - 1 \right], \quad (1.1)$$

где, I_{ϕ} – ток, генерируемый светом или фототок, I_0 – ток насыщения диода, U – напряжение, a – коэффициент идеальности диода, $N_{\text{яч}}$ – количество последовательно соединенных ячеек, $U_{\text{яч}}$ – температурное напряжение ячейки, которое может быть рассчитано в зависимости от температуры p-n перехода.

Параметры характеризующие фотоэлектрический модуль: ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент заполнения, коэффициент полезного действия, номинальная рабочая температура ячейки и коэффициент идеальности.

Основным способом определения работоспособности фотоэлектрических модулей является снятие ВАХ. В спецификациях фотоэлектрических модулей, предоставляемых производителями, содержатся числовые значения для трех точек ВАХ, определенные при стандартных условиях испытаний.

В условиях постоянного и равномерного солнечного излучения ВАХ характеризуется плавной формой без видимых отклонений или скачков.

При проектировании фотоэлектрической установки необходимо спрогнозировать ее ожидаемое годовое производство энергии. Для этого существует тепловая модель для оценки рабочей температуры модуля на базе локальных условий окружающей среды, таких как, солнечное излучение, температуры окружающей среды, скорость ветра и возможно направление ветра. Тепловая модель, основанная на эмпирических данных и описываемая уравнением 1.2 может применяться для всех типов модулей, обеспечивая прогнозируемую рабочую температуру модуля с точностью ± 5 градусов.[4]

$$T_m = E \cdot \{e^{a+b \cdot v}\} + T_{oc}, \quad (1.2)$$

где, T_m – температура тыльной стороны солнечного модуля, T_{oc} – температура окружающей среды, E – солнечное излучение, падающее на поверхность модуля, v – скорость ветра на высоте 10 метров, a – эмпирически определяемый коэффициент, устанвливающий верхний предел температуры модуля при низкой скорости ветра и высокой солнечной освещенности, b – эмпирически определяемый коэффициент, устанвливающий скорость, с которой температура модуля снижается при увеличении скорости ветра.

Согласно [4] температура ячеек и температура тыльной стороны модуля могут существенно отличаться. Температура ячеек внутри модуля может зависеть от температуры тыльной стороны модуля, представленная в уравнении 1.3, основана на предположении об одномерной теплопроводности через материалы модуля за ячейкой. Таким образом можно рассчитать температуру ячейки внутри модуля с использованием измеренной температуры задней поверхности и заранее определенной разности температур между задней поверхностью и ячейкой.

$$T_{яч} = T_m + \frac{E}{E_o} \cdot \Delta T, \quad (1.3)$$

где, $T_{яч}$ – температура ячейки, T_m – температура тыльной стороны солнечного модуля, E – солнечное излучение, падающее на поверхность модуля, E_o – справочное солнечное излучение, ΔT – разница температур

между ячейкой и задней поверхностью модуля при уровне освещенности 1000 Вт/м^2 .

Далее рассмотрим пошаговый метод моделирования фотоэлектрического модуля в среде PVLIB Python.

2. Моделирование фотоэлектрического модуля в среде PVLIB Python

Согласно вышеуказанному, нововведением в данном исследовании является применение библиотеки PVLIB Python для моделирования влияния частичного затенения на изменение вольтамперной характеристики фотоэлектрического модуля.

В первом этапе исследования задаем технические параметры рассматриваемого фотоэлектрического модуля JKM270P-60. Технические параметры полученные из базы данных [5] приведены в таблице 1.

Табл. 1.

$P_{\max} \text{ (STC), Вт}$	270,084
$P_{\max} \text{ (PTC), Вт}$	247,6
$V_{\text{mp}}, \text{ В}$	31,7
$I_{\text{mp}}, \text{ А}$	8,52
$V_{\text{xx}}, \text{ В}$	38,8
$I_{\text{кз}}, \text{ А}$	9,09
Температурный коэффициент $P_{\max}, \text{ \%}/^\circ\text{C}$	-0,41
Температурный коэффициент $V_{\text{xx}}, \text{ \%}/^\circ\text{C}$	-0,118728
Температурный коэффициент $I_{\text{кз}}, \text{ \%}/^\circ\text{C}$	0,005663
$N_{\text{яч}}, \text{ шт}$	60

Вторым этапом исследования является расчет температуры ячейки в соответствии с моделью Sandia Array performance Model[4], при уровне освещенности 1000 Вт/м^2 , 800 Вт/м^2 , 600 Вт/м^2 и 400 Вт/м^2 ; при температура окружающей среды $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, $-12,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $0 \text{ }^\circ\text{C}$, $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $25 \text{ }^\circ\text{C}$; при скорости ветра 0 м/с на высоте 10 метров , $a = -3,47$; $b = -0,0594$ и $\Delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C}$. [6]

В третьем этапе работы с помощью функции `pvliv.ivtools.sdm.fit_sec_sam` и `pvliv.pvsystem.calcparams_sec` [7, 8] проводилась оценка параметров для модели одиночного диода и были определены пять значений параметров для уравнения (1.1) одного диода с помощью модели Калифорнийской энергетической комиссии. Затем с использованием функции `pvliv.pvsystem.singleiode` и полученных пять

значений была построена ВАХ для каждого уровня освещенности при температуре от 60 °С до 40 °С с дискретностью 10 °С.

Всего было построено двенадцать ВАХ, для рассмариваемого фотоэлектрического модуля. Функции и модели PVLIB Python были использованы для моделирования влияния затенения на формы колебаний вольт-амперной характеристики фотоэлектрического модуля. Было сделано упрощающее предположение, что имитация затенения в работе являлась расчет температуры ячейки при разных уровнях освещенности. Для моделирования использовались параметры фотоэлектрического модуля из таблицы 1

3. Результаты

В работе была смоделирована вольт-амперная характеристика с учетом влияния затенения для поликристаллического фотоэлектрического модуля ЖКМ270Р-60. Определение температуры ячейки проводилось при пяти уровнях температуры окружающей среды и освещенности. Результаты приведены в таблице 2.

Табл. 2.

Солнечное излучение, Вт/м ²	Температура окружающей среды, °С				
	-25	-12,5	0	12,5	25
1000	9,11	21,62	34,42	46,61	59,11
800	2,29	14,79	27,29	39,79	52,29
600	-4,52	7,97	20,47	32,97	45,47
400	-11,47	1,15	13,65	26,15	38,65
ΔТ	20,47				

Также определили разность температур между максимальной и минимальной значений температуры ячейки, который составляет 20°С.

Исходя из таблицы 2 диапазон температуры ячейки был выбран при температуры окружающей среды 25°С, то есть от 60°С до 40°С, с дискретностью 10°С. В результате были построены вольтамперные характеристики при освещенности 1000 Вт/м², 800 Вт/м², 600 Вт/м² и 400 Вт/м² с диапазоном от 60°С до 40°С. Результаты показаны на рисунке 2.

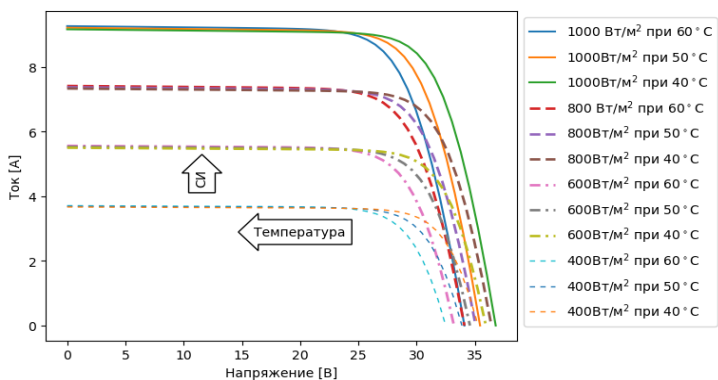


Рис.2. Вольт-амперные характеристики для солнечного модуля JKM270P-60
 Далее, были рассчитаны мощности при температуры ячейки от 60°C до 40°C и построили мощностные характеристики (рис. 3) при вышеуказанным значениям освещенности, а также были определены значения мощности в точке максимальной мощности. Данные приведены в таблице 3.

Табл. 3.

Солнечное излучение, Вт/м ²	Температура ячейки солнечного модуля, °C		
	60	50	40
1000	230,4	241,9	253,2
800	185	194,2	203,4
600	138,7	145,7	152,6
400	91,7	96,4	101,1

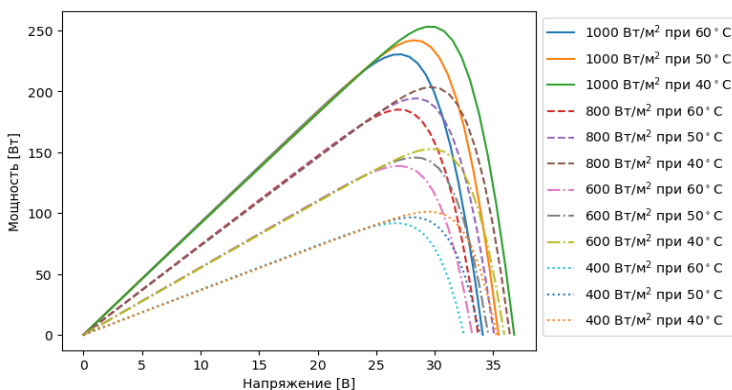


Рис.3. Мощностные характеристики для солнечного модуля JKM270P-60

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что использованные функции библиотеки PVLIB Python для определения температуры ячейки и построении ВАХ являются достаточно точным методом для практического применения. Представленные результаты показывают эффекты частичного затенения в стандартных случаях, таких как затенение листьями деревьев, затенение от близкорасположенных зданий или самозатенение. Они опасны, поскольку в длительном периоде могут привести к образованию горячих точек на солнечных модулях.

В будущих исследованиях можно будет моделировать любую форму частичного затенения фотоэлектрического модуля с помощью функции библиотеки PVLIB Python, после внесения соответствующих изменений в схему моделирования.

Список литературы

- [1] Vika H. B. Modelling of Photovoltaic Modules with Battery Energy Storage in Simulink/Matlab: With in-situ measurement comparisons // 134. 2014.
- [2] Mohamed M. A., Zaki Diab A. A., Rezk H. Partial shading mitigation of PV systems via different meta-heuristic techniques // Renewable Energy. 2019. (130). С. 1159–1175.
- [3] Patel H., Agarwal V. MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2008. № 1 (23). С. 302–310.
- [4] PV Performance Modeling Collaborative | Sandia PV Array Performance Model [Электронный ресурс]. URL: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/point-value-models/sandia-pv-array-performance-model/> (дата обращения: 27.02.2023).
- [5] pvlib.pvsystem.retrieve_sam — pvlib python 0.9.4 documentation // URL: https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.pvsystem.retrieve_sam.html (дата обращения: 27.02.2023).
- [6] pvlib.temperature.sapm_cell — pvlib python 0.9.4 documentation // URL: https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.temperature.sapm_cell.html (дата обращения: 27.02.2023).
- [7] pvlib.ivtools.sdm.fit_cec_sam — pvlib python 0.9.4 documentation // URL: https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.ivtools.sdm.fit_cec_sam.html (дата обращения: 27.02.2023).
- [8] pvlib.pvsystem.calcparams_cec — pvlib python 0.9.4 documentation // URL: https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.pvsystem.calcparams_cec.html (дата обращения: 27.02.2023).

THE EFFECT OF IRREGULAR HEATING OF PHOTOVOLTAIC MODULES UNDER PARTIAL SHADING ON THEIR EFFICIENCY

A.G. Vaskov (*vaskovag@mpei.ru*)

I.N. Ainulloeva (*ainulloyevain@mpei.ru*)
National Research University “MPEI”, Moscow

The paper represents a mathematical model describing the non-uniform distribution of temperature over the surface of the module and makes it possible to evaluate the change in its efficiency under partial shading conditions.

Keywords: mathematical model, photovoltaic modules, shading, efficiency, PVLIB library.