

УДК 519.711.3 : 621.311.25

А. В. ЛЕВШОВ (канд. техн. наук, доц.), **А. Ю. ФЁДОРОВ**,
 Государственное высшее учебное заведение
 «Донецкий национальный технический университет»
fedorovanatolii@mail.ru

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Рассмотрены вопросы создания математической модели фотоэлектрической системы (ФЭС). На основании известного математического и аналитического описания создана Simulink модель, которая позволяет получать вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоэлектрических модулей (систем) разных производителей и оценивать энергетические параметры работы фотоэлектрических модулей (систем) при различных уровнях солнечной радиации.

Ключевые слова: фотоэлектрический солнечный элемент, вольт-амперная характеристика, мощностная характеристика, уровень солнечной радиации, эквивалентная схема замещения, математическая модель.

Постановка проблемы. Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для получения электрической энергии становится неотъемлемой частью современной энергетики. Среди прочих ВИЭ солнечная энергия занимает ключевые позиции. Так как Солнце существует уже миллиарды лет и принято считать, что данный источник энергии неисчерпаем, доступен по всей поверхности Земли и что еще более важно является бесплатным. Фотоэлектрические системы (ФЭС) способны непосредственно преобразовывать энергию солнечной радиации в электрическую, не имеют подвижных частей, с нулевыми выбросами вредных веществ в атмосферу и, как следствие, являются очень надежными и простыми в эксплуатации. Недостатками на данный момент являются: высокая стоимость производства фотоэлектрических элементов.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. ФЭС состоит из совокупности фотоэлектрических модулей (ФЭМ), вольт-амперные характеристики (ВАХ) которых являются нелинейными функциями, зависящими от изменения уровня солнечной радиации и температуры окружающей среды. Из всех попыток создания математической модели фотоэлектрического элемента (ФЭ) было выделено несколько основных схем замещения, математическое описание которых используется в современном моделировании на персональном компьютере (ПК). [1-5]

Постановка задачи. В данной работе представлена математическая модель фотоэлектрического модуля, реализованная в программном пакете Matlab-Simulink. В новых версиях данного программного пакета уже существует стандартный блок Solar Cell, однако, при моделировании фотоэлектрических систем большой мощности необходим значительный мощностной ресурс ПК. В работе поставлена цель создания нового пользовательского блока, который позволяет проводить те же вычисления, используя меньший ресурс ПК не уменьшая точности моделирования.

Как известно, ФЭ - это полупроводниковое устройство, предназначенное для преобразования электромагнитного солнечного излучения в электрическую энергию. Наиболее часто для изготовления ФЭ используется кристаллический кремний. ФЭ представляют собой пластину, размеры которой по технологическим особенностям производства не могут превышать определенного значения. При последовательном, параллельном, или комбинированном соединении этих элементов между собой, набираются ФЭМ, а из них соответственно ФЭС (рис. 1).

Каждый элемент изготавливается в виде *p-n-перехода*. При попадании солнечного света в граничную зону *n-* и *p-* типа возникает электродвижущая сила (рис. 2), которая создает электрический ток в замкнутом внешнем контуре,

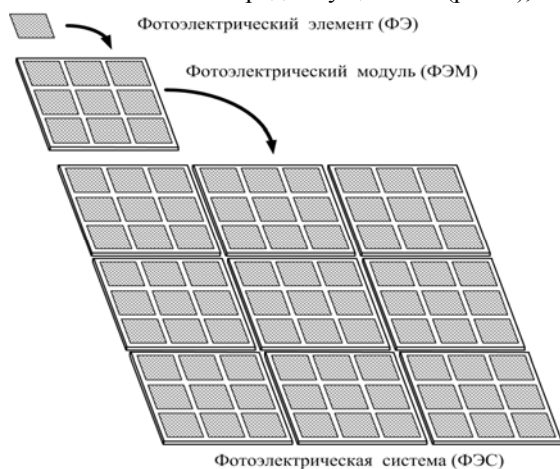


Рисунок 1 – Фотоэлектрическая иерархия

подключенном к контактам ФЭ. Носители заряда, возникающие в элементе, создают так называемый фототок, который пропорционален уровню солнечной радиации. Наибольшее практическое использование получили ФЭ изготовленные на основе моно- и поликристаллического кремния. Стоимость производства ФЭ на базе поликристаллического кремния ниже.

Свойства ФЭ изучаются уже на протяжении длительного периода времени. Для моделирования их характеристик используется несколько наиболее распространенных эквивалентных схем замещения (рис. 2).

Все ФЭ обладают нелинейными вольт-амперными и мощностными характеристиками (рис.2д), которые зависят от уровня солнечной радиации, температуры окружающей среды и особенностей самой ячейки.

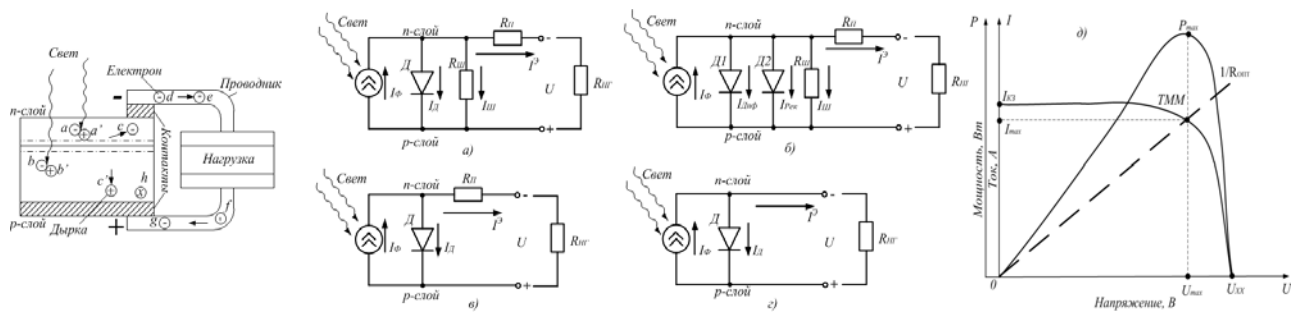


Рисунок 2 – Эквивалентные схемы замещения и характеристики ФЭ [1,2]

а) обобщенная; б) модель с двойным экспоненциалом; в) упрощенная; г) идеализированная; д) типовые вольт-амперная (1) и мощностная (2) характеристики фотоэлектрического элемента.

Каждая схема замещения имеет свои преимущества и недостатки. Из рис. 2 видно, что все схемы замещения имеют общую часть, представленную в виде источника фототока (I_{ϕ}) и параллельно включенного диода (D), который моделирует $p-n$ -переход. Некоторые схемы (рис.2а, 2б) содержат шунтовое сопротивление ($R_{ш}$), моделирующее токи утечки, и последовательное сопротивление (R_n), которое характеризует внутреннее сопротивление элемента и контактов (рис. 2а, 2б, 2в). Изменение R_n значительно сильнее влияет на получаемый результат [2], поэтому оно учитывается во всех схемах замещения, кроме идеализированной (рис.2г).

Схема замещения, показанная на рис. 2г, позволяет получить указанные выше характеристики, но со значительными отклонениями от характеристик реального ФЭ, так как не учитывает ток утечки и внутреннее сопротивление. Схема, показанная на рис. 2а, улучшает получаемые результаты, однако увеличивает время расчета на ПК.

Еще более точное математическое описание фотоэлектрическому элементу дает модель, представленная на рис.2б. Данная схема замещения достаточно точно описывает поведение элемента, изготовленного из поликристаллического кремния, но помимо источника фототока, шунтового и последовательного сопротивления, вместо одного, параллельно включенного источнику фототока диода, имеет два параллельно включенных диода, которые отображают протекание через $p-n$ -переход диффузионного и рекомбинационного токов. Существенный недостаток данной модели сложность определения параметров выражения для ВАХ ФЭ. [3]

С учетом изложенного, для разработки математической модели ФЭ, принимаем схему, изображенную на рис.2в. В данной схеме принято допущение, что ток утечки отсутствует, т.е. $R_{ш}$ стремиться к бесконечности и фотоэлемент нечувствителен к изменению этого сопротивления. Таким образом, в соответствии со схемой замещения выходной ток фотоэлемента может быть определен из выражения (1). [2]

$$I^{\ominus} = I_{\phi} - I_D = I_{\phi} - I_0 \cdot \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot (U^{\ominus} + I^{\ominus} \cdot R_n)}{A \cdot k \cdot T^{\ominus}} \right] - 1 \right\}, \tag{1}$$

где A – коэффициент полученный при сравнении теоретической и экспериментальной ВАХ, зависит от физических свойств материалов, которые используются для производства фотоэлектрических элементов и толщины $p-n$ -перехода, принимается равным от 1 до 5 (см. табл. 1);

k – постоянная Больцмана, ($k=1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T^{\ominus} – абсолютная температура элемента, (К);

q – заряд электрона, ($q=1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл);

U^{\ominus} – выходное напряжение элемента, (В);

I_D – темновой ток, т.е. ток, протекающий через диод при отсутствии облучения и подаче на выводы ФЭ напряжения от внешнего источника (сильно зависит от температуры), (А);

I_0 – обратный ток $p-n$ перехода диода, создается неосновными носителями заряда, (А)

Таблица 1 – Значения коэффициента A в зависимости от материалов, использованных для производства фотоэлементов. [4]

Материал	Коэффициент A
Si-монокристаллический	1,2
Si-поликристаллический	1,3
a-Si:H	1,8
a-Si:H двойной	3,3
a-Si:H тройной	5
CdTe	1,5
CIS	1,5
AsGa	1,3

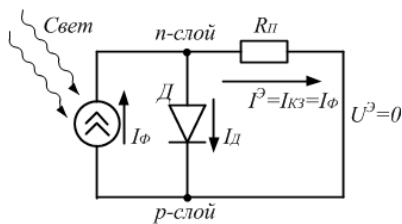


Рисунок 3 - Режим короткого замыкания фотоэлектрического элемента

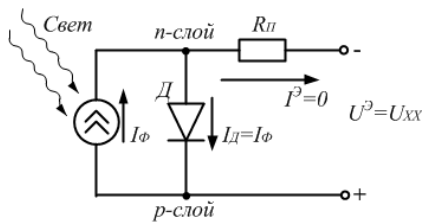


Рисунок 4 – Режим холостого хода фотоэлектрического элемента

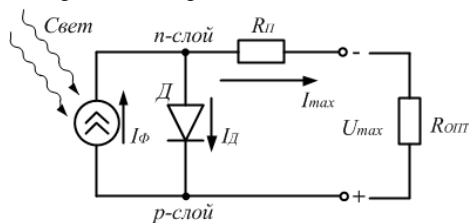


Рисунок 5 – Режим выдачи максимальной мощности фотоэлектрического элемента

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_R} = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{S \cdot G_a},$$

где G_a – величина солнечного излучения ($Вт/м^2$); S – площадь фотоэлектрического элемента ($м^2$).

5) Коэффициент заполнения – показывает отношение максимальной мощности к произведению $I_{кз}$ на $U_{хх}$:

$$FF = \frac{P_{\max}}{U_{XX} \cdot I_{K3}} = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{U_{XX} \cdot I_{K3}}$$

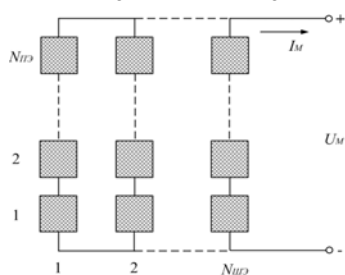


Рисунок 6 – Структура ФЭМ

Реальный ФЭ обладает несколькими основными параметрами, которые приводятся в паспорте, предоставляемым заводом изготовителем. Основными являются следующие параметрами ФЭ:

1) Ток короткого замыкания. Это наибольший ток производимый элементом при условии замыкания контактов (рис. 3)

$$I_{кз} = I^э = I_{\phi}$$

$$U^э = 0$$

2) Напряжение холостого хода. Соответствует падению напряжения на диоде ($p-n$ -переходе), когда последний, пересекается фототоком (I_{ϕ}), а ток во внешней цепи ($I^э$) равен 0 (рис. 4), что математически может быть выражено следующим образом:

$$I^э = 0$$

$$U^э = U_{хх}$$

$$U_{XX} = \frac{A \cdot k \cdot T^э}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{\phi} + I_0}{I_0} \right) = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_{\phi} + I_0}{I_0} \right)$$

где U_T – термальное напряжение, (В).

3) Точка максимальной мощности (ТММ). Точка на кривой ВАХ (рис. 2д) в которой мощность рассеиваемая в нагрузке ($R_{опт}$) является максимальной (рис. 5)

$$P_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max}$$

$$I^э = I_{\max}$$

$$U^э = U_{\max}$$

4) Коэффициент полезного действия (КПД) – представляет собой отношение между максимальной мощностью (P_{\max}) и мощностью улавливаемого солнечного излучения (P_R):

Как уже говорилось выше, при последовательном, параллельном или комбинированном соединении фотоэлектрических элементов образуются ФЭМ (рис. 6).

Для построения математической модели ФЭМ введем несколько индексных обозначений. Параметры, которые будут иметь индекс «М» относятся к параметрам модуля, а параметры с индексом «Э» - к параметрам элемента. Так, например, на рис.6 параметр I_M является выходным током модуля, а параметр U_M - напряжением на выводах модуля.

Выходной ток ФЭМ можно получить из выражения (1) – выходного тока элемента, путем его преобразования и с учетом принятых индексных обозначений [5]:

$$I^M = I_{кз}^M \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{U^M - U_{XX}^M + I^M \cdot R_{л}^M}{U_T^M} \right) \right],$$

где $I_{кз}^M = I_{кз}^э \cdot N_{шэ}$ - ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля;

$U_{XX}^M = U_{XX}^э \cdot N_{пэ}$ - напряжение холостого хода модуля;

$$R_{II}^M = R_{II}^{\text{э}} \cdot \frac{N_{II\text{э}}}{N_{III\text{э}}} - \text{эквивалентное последовательное сопротивление модуля};$$

$$U_T^M = \frac{A \cdot k \cdot T^{\text{э}}}{q} \cdot N_{II\text{э}} = U_T^{\text{э}} \cdot N_{II\text{э}} - \text{эквивалентное термальное напряжение модуля};$$

$N_{II\text{э}}$ - количество последовательно соединенных ФЭ в ФЭМ;

$N_{III\text{э}}$ - количество параллельно соединенных ФЭ в ФЭМ.

Как правило, заводы изготовители технические характеристики ФЭМ приводят для «нормальных условий» или «стандартных условий», параметры которых приведены в *табл. 2*.

Таблица 2 – Параметры условий испытаний ФЭМ

Параметр	Нормальные условия	Стандартные условия
Уровень солнечной радиации, Bm/m^2	$G_{a1} = 800$	$G_{a0} = 1000$
Температура окружающей среды (воздуха), $^{\circ}C$	$T_{a1} = 20$	Температура ФЭ: $T_0^{\text{э}} = 25$
Скорость ветра, m/c	1	

Параметры, полученные при стандартных условиях будем обозначать индексом «0», а индекс «1» будут иметь величины, полученные при нормальных условиях.

Для дальнейших исследований в качестве расчетных принимаем параметры, характерные для стандартных условий работы фотоэлектрических преобразователей.

Теперь мы имеем все необходимые выражения для моделирования ФЭМ и получения их характеристик. Объектом моделирования приняты ФЭМ KV-185/24M производства завода «КВАЗАР», технические характеристики которых приведены в *табл. 3*.

Таблица 3 – Параметры KV-185/24M от производителя «КВАЗАР» г. Киев

Параметр	Значение
Максимальная мощность, P_{TMM}^M, Bm	185
Ток короткого замыкания, I_{K3}^M, A	5.53
Напряжение холостого хода, U_{XX}^M, B	45
Ток в ТММ, I_{TMM}^M, A	5.14
Напряжение в ТММ, U_{TMM}^M, B	36.05
Количество последовательно соединенных элементов, $N_{II\text{э}}, шт$	72
Количество параллельно соединенных цепей элементов, $N_{III\text{э}}, шт$	1

На основании приведенных выше выражений в среде Matlab [6,7], создана Simulink модель фотоэлектрического модуля (KV-185/24M) (см. рис. 7) Для моделирования используем стандартные математические блоки библиотеки Simulink. Входными параметрами блока являются технические параметры ФЭМ по каталожным данным завода изготовителя, уровень солнечной радиации, температура окружающей среды.

При моделировании расчет параметров выполнен с помощью метода Эйлера с шагом расчета $k=0.0001$.

На рис.7 показана Simulink модель фотоэлектрического модуля KV-185/24M и внутренняя структура разработанного пользовательского блока. Блок имеет 3 входа и выход в виде положительного и отрицательного контакта модуля, а так же имеет диалоговое окно для ввода паспортных данных от завода изготовителя (рис. 8). Для построения характеристик ФЭМ добавлены еще некоторые элементы, например, такие как измерители тока и напряжения, а также XY осциллограф (рис. 9).

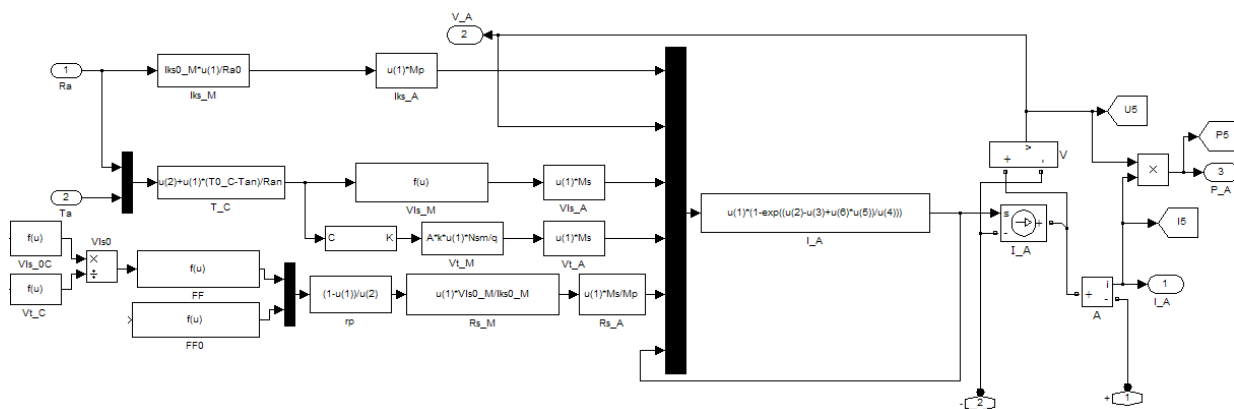


Рисунок 7 - Simulink модель фотоэлектрического модуля KV-185/24M в Matlab

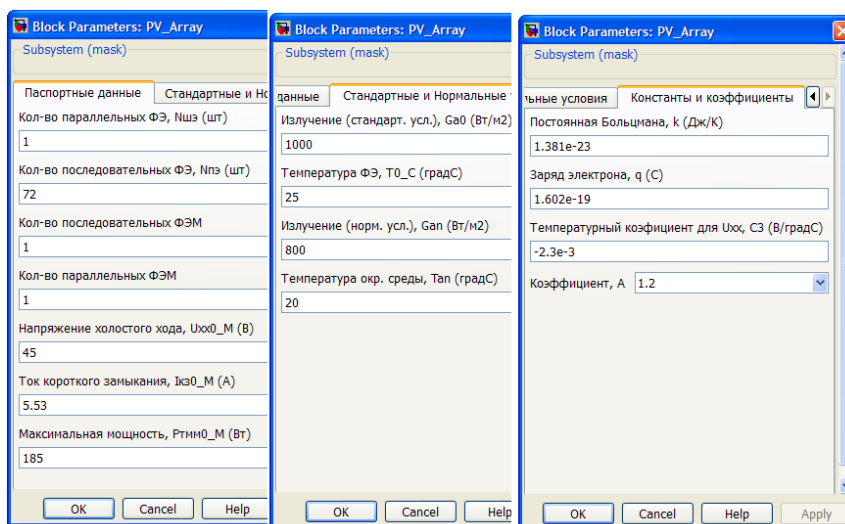


Рисунок 8 – Диалоговое окно нового блока для ввода параметров ФЭМ

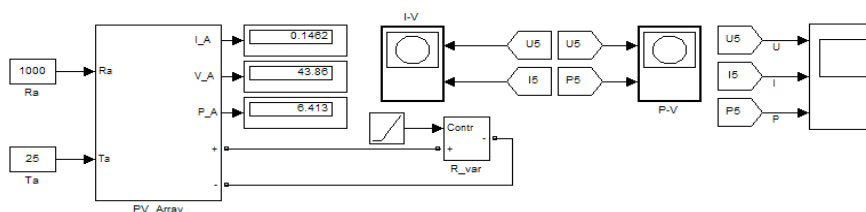


Рисунок 9 - Simulink модель фотоэлектрического модуля для снятия характеристик

Сравнение полученных с помощью модели ВАХ с данными завода изготовителя (рис. 10а, 10б), свидетельствуют о достаточно высокой точности моделирования. Так, например, значение выходной мощности ФЭМ в точке максимальной мощности при стандартных условиях, полученное на модели отличается от каталожного значения на величину не более $\pm 1,5\%$. Аналогичная точность достигается и при определении тока короткого замыкания и напряжения холостого хода.

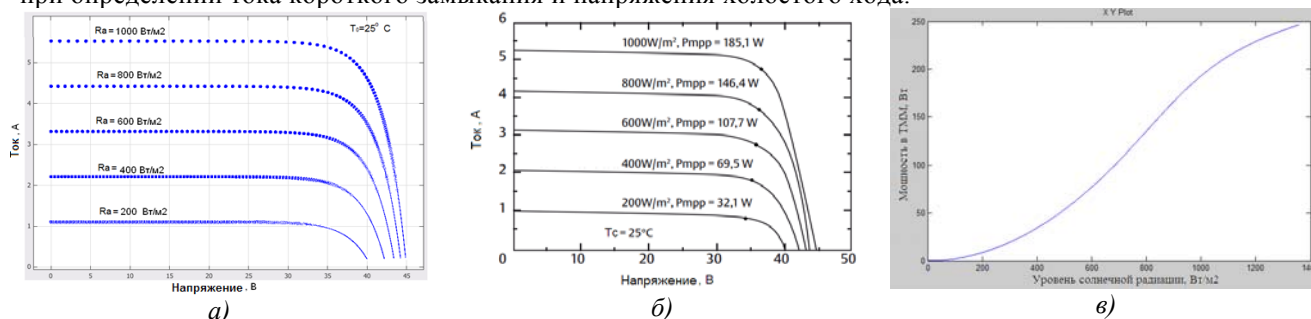


Рисунок 10 – Вольт-амперные и мощностные характеристики модуля KV-185/24М:

а) вольт-амперная и мощностная характеристики, полученные на модели; б) ВАХ - по данным завода изготовителя; в) максимальная выходная мощность ФЭМ KV-185/24М при различных уровнях радиации (результат моделирования)

Выводы. Разработана математическая модель фотоэлектрической системы, реализованная в Matlab/Simulink. Создано специальное пользовательское окно для ввода параметров как отдельных фотоэлементов, так и модулей (фотоэлектрических систем), как и у стандартных блоков Matlab. Выполнено компьютерное моделирование фотоэлектрической системы, построенной на основе модуля KV-185/24М. Полученные модельные вольтамперные и мощностные характеристики модуля соответствуют данным завода изготовителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huan-Liang Tsai «Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK» / Huan-Liang Tsai // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS 2008, October 22 - 24, 2008. - San Francisco, USA, 2008.
2. Раушенбах Г. «Справочник по проектированию солнечных батарей» / Г. Раушенбах. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 360 с.

3. Gow J. A. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies / J. A. Gow, C. D. Manning // *IEE Proceedings- Electric Power Applications*.- 1999.- vol. 146, no. 2.- 193-199.
4. Hua C. C. Study of maximum power tracking techniques and control of dc-dc converters for photovoltaic power system/ C. C. Hua, C. M. Shen // *Proceedings of 29th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*.- 1998.- vol. 1.-P. 86-93.
5. Lorenzo E. Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems / E. Lorenzo// Artes Graficas Gala. – Spain, 1994.
6. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. В. Г. Потемкин. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 496 с.
7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. - М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

REFERENCES

1. Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu and Yi-Jie Su “Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK” Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 (WCECS 2008), San Francisco, USA. 2008.
2. Rauschenbach G. Handbook for designing solar cells - M. Energoatomizdat, 1983. 360 p.
3. Gow J. A., Manning C. D. «Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies» IEE Proceedings- Electric Power Applications. 1999; vol. 146, no. 2: 193-199.
4. Hua C. C., Shen C. M. Study of maximum power tracking techniques and control of dc-dc converters for photovoltaic power system// Proceedings of 29th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. 1998; vol. 1: 86-93.
5. Lorenzo E. Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems/ Artes Graficas Gala, Spain, 1994.
6. Chernih I.V. Simulink: creation environment for engineering applications / Ed. Ph.D. V. G. Potemkin - Moscow: Dialog-MIFI, 2003. 496.
7. Chernih I. V. Modeling of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink - Moscow: DMK Press, 2008. 288с.

Надійшла до редакції 24.03.2013

Рецензент: Е.Г. Курінний

О. В. ЛЕВШОВ, А. Ю. ФЕДОРОВ

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

Про математичне моделювання фотоелектричних модулів. Розглянуто питання створення математичної моделі фотоелектричної системи (ФЕС). На підставі відомого математичного та аналітичного опису створена Simulink модель, яка дозволяє отримувати вольт-амперні характеристики (ВАХ) фотоелектричних модулів різних виробників і оцінювати енергетичні параметри роботи фотоелектричних модулів (систем) при різних рівнях сонячної радіації.

Ключові слова: фотоелектричний сонячний елемент, вольт-амперна характеристика, характеристика потужності, рівень сонячної радіації, еквівалентна схема заміщення, математична модель.

A. LEVSHOV, A. FEDOROV

State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

Mathematical Modeling of Photovoltaic Modules. The problems of creating a mathematical model of photovoltaic system (PVS) are considered. Based on the well-known mathematical and analytical description Simulink mode is created, which allows to get the current - voltage (IV) characteristics of photovoltaic modules from different manufacturers and evaluate the energy parameters of the PV modules (systems) at different levels of solar radiation. This article focuses on a Matlab/Simulink model of a photovoltaic module (system). For creating of this model we studied well-known mathematical models and equivalent circuits of photovoltaic cells. Based on the analysis of well-known equivalent circuits of photovoltaic cells and their mathematical description we are selecting for modeling a scheme that takes into account: the generated photocurrent, dark current and shunt resistance. Based on the standard blocks of Matlab/Simulink we created a custom block with dialog box for entering the parameters of individual photovoltaic cells and modules. Our model allows getting all the interesting characteristics with sufficient accuracy and high modeling speed on the personal computer.

Key words: photovoltaic solar cell, current-voltage characteristics, power characteristics, level of solar radiation, equivalent circuit, mathematical model.