

## ЭНЕРГОБЕСПЕЧЕНИЕ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.311.001.57

У.Р. Ярмухаметов, А.Т. Ахметшин

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Разработана математическая модель для исследования работы солнечных установок с учетом влияния внешних и внутренних факторов и степени ориентации фотоэлектрического преобразователя на Солнце в среде Matlab/Simulink.

**Ключевые слова:** солнечная установка, фотоэлектрический преобразователь, математическая модель, система слежения за Солнцем, вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики.

U.R. Yarmukhametov, A.T. Akhmetshin

### THE OPERATING MODE SIMULATION MODELING OF SOLAR INSTALLATIONS WITH PHOTOELECTRIC CONVERTERS DEPENDING ON INTERNAL AND EXTERNAL FACTORS IN THE MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

The mathematical model for the study of solar installations taking into account the internal and external factors, the photovoltaic converter orientation degree on the Sun in the Matlab/Simulink environment is developed.

**Key words:** solar installation, photoelectric converter, mathematical model, Sun tracker system, voltage-amp and voltage-watt characteristics.

**Введение.** Препятствием активному внедрению солнечных установок (СУ) с фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП), наряду с высокой стоимостью и низким КПД ФЭП, относят нестабильность вырабатываемой ими электрической энергии, связанной с временной изменчивостью прихода солнечной радиации, ее рассеянностью, низкой плотностью и зависимостью от климатических и географических условий.

Одним из способов повышения эффективности СУ с ФЭП является использование системы слежения за Солнцем, которая позволяет увеличить выходную мощность ФЭП и дневной интервал генерирования электрической энергии. Одновременно это ведет к усложнению конструкции, снижению надежности и удорожанию СУ в целом. Поэтому целесообразность применения систем слежения в СУ с ФЭП определяется после проведения соответствующих расчетов и исследований с учетом внешних (приход солнечной радиации на поверхность ФЭП, температура окружающего воздуха на месте предполагаемой эксплуатации установки) и внутренних (определяются свойствами исходного полупроводника, технологией изготовления фотопреобразователя и параметрами ФЭП) факторов.

Исходя из этого сформулирована **цель работы:** исследование работы СУ с учетом влияния внешних и внутренних факторов и степени ориентации приемной поверхности ФЭП на Солнце.

Для достижения сформулированной цели в настоящей работе поставлена **задача:** разработать математическую модель для определения энергетических показателей СУ с ФЭП в зависимости от внутренних и внешних факторов и степени ориентации приемной поверхности ФЭП на Солнце.

**Методика и результаты исследования.** В основу математического моделирования была заложена классическая модель фотопреобразователя с  $p-n$  переходом [1]

$$U = \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left[ \frac{(J_{\phi} - J)}{J_0} + 1 \right] - JR, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение, В;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – рабочая температура ФЭП, К;  $q$  – заряд электрона, Кл;  $J_{\phi}$  – фототок, пропорциональный интенсивности солнечного излучения  $I$ , падающего на

поверхность ФЭП  $\left( \frac{J_{\phi}}{I} = const \right)$ ,  $A/cm^2$ ;  $J$  – ток,  $A/cm^2$ ;  $J_o$  – обратный ток насыщения, определяемый свойствами исходного полупроводника и технологией изготовления ФЭП, определялся из выражения (1) при условии  $J = 0$  и  $U = U_{XX}$ ,  $A/cm^2$ ;  $R$  – внутреннее электрическое сопротивление,  $Om \cdot cm^2$ ;  $A$  – безразмерный параметр кривизны вольт-амперной характеристики (ВАХ),  $A = 1...2$  [1].

Для исследования энергетических характеристик СУ с ФЭП была разработана математическая модель, реализованная в программной среде Matlab/Simulink (рис. 1).

Математическая модель позволяет оценить влияние на выходные характеристики модуля ФЭП как внутренних (число последовательно, параллельно соединенных элементов, внутреннего сопротивления), так и внешних факторов (интенсивности солнечного излучения, температуры воздуха, степени ориентации модуля ФЭП на Солнце в зависимости от времени года и суток).

В целях ее апробации построены ВАХ и вольт-ваттная характеристика (ВВХ) для модуля ФЭП, состоящего из 2 параллельно соединенных блоков (с 36 последовательно соединенными элементами в каждом), при стандартных условиях освещения AM1 ( $I_0 = 1000 \text{ Вт} / \text{ м}^2$ ) и рабочей температуре  $T_0 = 25^{\circ}C$  (рис. 2).

Фотоэлементы из монокристаллического кремния имеют следующие характеристики:  $J_{o_{к.з.}} = 47 \text{ мА} / \text{ см}^2$ ;  $U_{o_{XX}} = 600 \text{ мВ}$ ;  $R = 1 \text{ Ом} \cdot \text{ см}^2$ ; площадь  $S = 98,92 \text{ см}^2$ ; значения коэффициента приняли  $A = 1,2$ .

Фотоэлектрический модуль, согласно паспортным данным, выдает максимальную мощность  $P_{\max} = 120 \text{ Вт}$ ,  $U_{XX} = 22 \text{ В}$ ,  $J_{к.з.} = 7,34 \text{ А}$ , оптимальное рабочее напряжение  $U_{ОПТ} = 18 \text{ В}$  и ток  $J_{ОПТ} = 6,66 \text{ А}$ .

Рис. 1. Математическая модель СУ с ФЭП в программной среде Matlab/Simulink

Как видно из рисунка 2, полученные характеристики совпадают с паспортными, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Однако реальные характеристики ФЭП значительно отличаются от стандартных вследствие изменения параметров внешней среды (интенсивности солнечного излучения и температуры воздуха), которые зависят от географического положения предполагаемой эксплуатации установки, времени года, суток и степени ориентации СУ на Солнце.

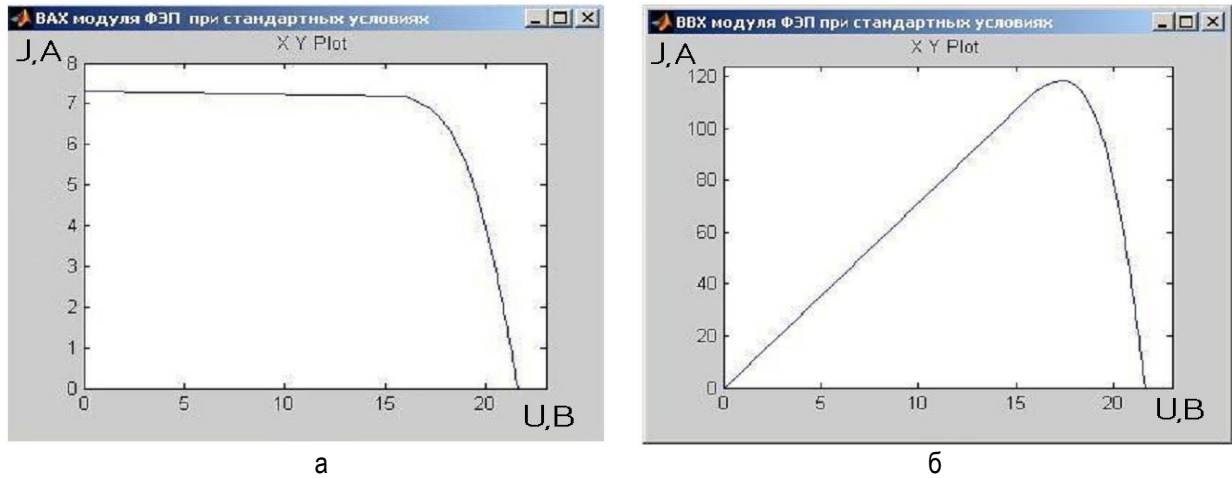


Рис. 2. Характеристики модуля ФЭП при стандартных условиях освещения AM1 и рабочей температуре  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  : а – VAX; б – BVX

Влияние изменения интенсивности солнечного излучения и рабочей температуры на ВАХ ФЭП можно записать в виде выражений [2]:

$$J_{K.3.} = J_{o_{K.3.}} + \Delta J_I + \Delta J_T; \quad (2)$$

$$U_{XX} = U_{o_{XX}} + \Delta U_{11} + \Delta U_{12} + \Delta U_T, \quad (3)$$

где  $J_{o_{K.3.}}$  и  $U_{o_{XX}}$  – исходный ток короткого замыкания и напряжение холостого хода, измеренные при стандартных условиях;  $\Delta J_I, \Delta U_{11}, \Delta U_{12}$  – поправки, учитывающие изменение плотности потока солнечного излучения;  $\Delta J_T, \Delta U_T$  – поправки, учитывающие изменение рабочей температуры:

$$\Delta J_I = \frac{I - I_0}{I_0} J_{o_{K.3.}}; \quad (4)$$

$$\Delta U_{11} = -\Delta J_I \cdot R_{II}; \quad (5)$$

$$\Delta U_{12} = \kappa \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right); \quad (6)$$

$$\Delta J_T = \beta_I \cdot J_{o_{K.3.}} (T - T_0); \quad (7)$$

$$\Delta U_T = \beta_U \cdot U_{XX} (T - T_0), \quad (8)$$

где  $R_{II}$  – последовательное сопротивление элемента;  $\kappa$  – коэффициент, зависящий от типа солнечного элемента;  $\beta_I, \beta_U$  – температурные коэффициенты тока и напряжения,  $1/^\circ\text{C}$ .

В ходе моделирования для определения интенсивности солнечной радиации (прямой, рассеянной и суммарной) на горизонтальную поверхность использовались данные многолетних наблюдений [3]. Для ис-

ключения интервалов, интенсивности в которых не известны, использовался метод полиномиальной аппроксимации [7].

Суммарная интенсивность солнечного излучения на стационарную наклонную поверхность, ориентированную на юг, была рассчитана по выражению [1]

$$I_H = I_{\Pi} \frac{\cos \xi}{\cos \theta} + I_{\text{Д}} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho(I_{\Pi} + I_{\text{Д}}) \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (9)$$

где  $I_{\Pi}$ ,  $I_{\text{Д}}$  – интенсивность прямого и рассеянного (диффузного) солнечного излучения на горизонтальную поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – угол между направлениями на Солнце и зенит, в град, определяется по формуле (10);  $\xi$  – угол между направлением на Солнце и нормалью к наклонной поверхности, ориентированной на юг, в град, определяется по формуле (11);  $\beta$  – угол наклона рассматриваемой поверхности к горизонту, в град;  $\rho$  – коэффициент отражения (альбедо) поверхности Земли и окружающих тел [3].

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega. \quad (10)$$

$$\cos \xi = \sin(\varphi - \beta) \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega, \quad (11)$$

где  $\delta$  – склонение Солнца, определяется по формуле Купера, в град [1];  $\varphi$  – широта местности, в град;  $\omega$  – часовой угол движения Солнца, в град.

Часовой угол рассчитывался по формуле [5]

$$\omega = (15^{\circ} \text{час}^{-1})(t_{\text{solar}} - 12), \quad (12)$$

где  $t_{\text{solar}}$  – локальное солнечное время, в часах.

Расчет суммарной интенсивности солнечного излучения на приемник, расположенный под углом  $\beta$  и ориентирующийся на Солнце только по одной координате (азимутальное слежение), производился по формуле (9), с разницей в нахождении угла между направлением на Солнце и нормалью (вместо  $\xi$  используется  $i$ ). Данный угол определялся по формуле [6]

$$\cos i = \sin \beta [\cos \delta (\sin \varphi \cos a_{\Pi} \cos \omega + \sin a_{\Pi} \sin \omega) - \sin \delta \cos \varphi \cos a_{\Pi}] + \cos \beta [\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi]. \quad (13)$$

где  $a_{\Pi}$  – азимут приемника.

При слежении за Солнцем по азимуту азимут приемника равен азимуту Солнца ( $a_{\Pi} = a$ ) и определялся по формуле [6]

$$a = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \sin \varphi}{\cos \alpha}\right), \quad (14)$$

где  $\alpha$  – угол высоты Солнца, определялся по формуле

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \Rightarrow \alpha = \arcsin(\cos \theta). \quad (15)$$

Суммарная интенсивность солнечного излучения при полной ориентации поверхности была рассчитана по выражению

$$I_{OP} = \frac{I_{II}}{\cos \theta} + I_{Д} \frac{(1 + \cos \theta)}{2} + \rho(I_{II} + I_{Д}) \frac{1 - \cos \theta}{2}. \quad (16)$$

Для расчета температуры окружающего воздуха были привлечены ежечасные данные по температуре окружающего воздуха, приведенные в справочнике [4], и применялась аналитическая зависимость изменения температуры воздуха в течение времени, учитывающая среднесуточную, суточную амплитуду, период изменения температуры воздуха [7].

Все вышеприведенные выражения были учтены в разработанной математической модели.

Результаты моделирования работы модуля ФЭП, характеристики которого приведены выше с учетом  $\beta_I = 0,0006^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\beta_U = -0,0032^\circ\text{C}^{-1}$ , для климатических условий п. Кушнареново Республики Башкортостан (РБ) ( $\varphi = 54^\circ$ ) в 17ч локального солнечного времени 22 июня представлены на рисунке 3.

Анализ показывает, что пиковая выходная мощность модуля ФЭП с системой слежения за Солнцем в указанное время в два раза больше мощности стационарного. Причем полная ориентация модуля на Солнце дает практически те же характеристики, что и при частичной (азимутальной) ориентации.

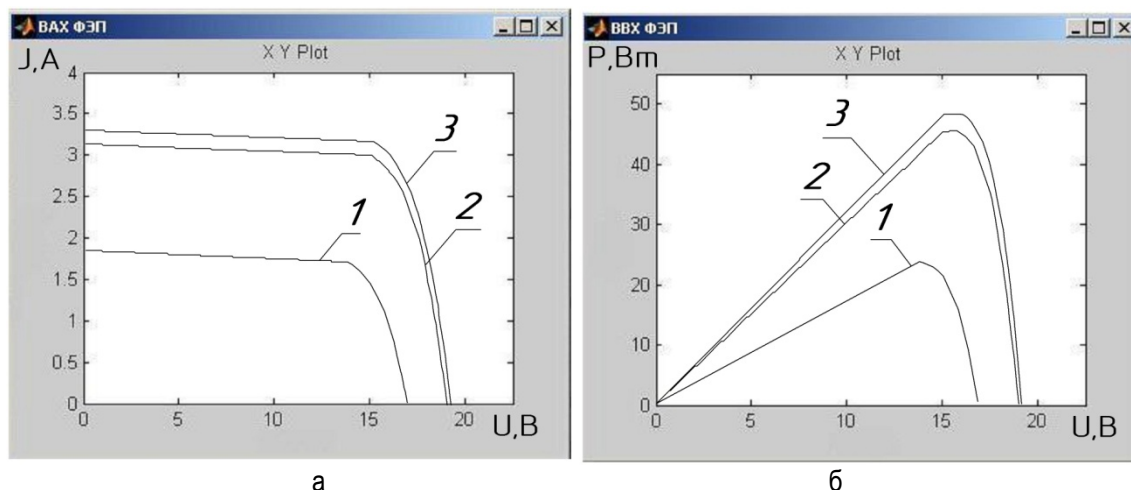


Рис. 3. ВАХ (а) и ВВХ (б) модуля ФЭП, установленного в поселке Кушнареново РБ для 22 июня 17 ч локального солнечного времени: стационарного (1), с азимутальным слежением (2) и расположенного под углом к горизонту  $\beta = 35^\circ$ ; с полной ориентацией (3)

На рисунке 4 представлены дневные выработки мощности СУ при различной ориентации ФЭП в тех же климатических условиях в середине лета, осени, зимы и весны.

Вырабатываемая в течение светового дня 15 апреля мощность ФЭП с азимутальным слежением на 28 % больше мощности, вырабатываемой стационарной системой (рис. 4, а). Система с полной ориентацией на Солнце эффективнее азимутальной на 3,5 %. Соответственно для 15 июля (рис. 4, б) мощность ФЭП с азимутальным слежением на 34 % больше стационарной системы. Полная ориентация ФЭП увеличивает выходную мощность на 55 % по сравнению со стационарной системой и на 16 % по сравнению с азимутальным слежением. Для 15 октября (рис. 4, в) применение азимутального слежения увеличивает выходную мощность на 5 %, а полное слежение – на 8,5 % по сравнению со стационарной системой. 15 января (рис. 4, г) соответственно на 5 и 17 %.

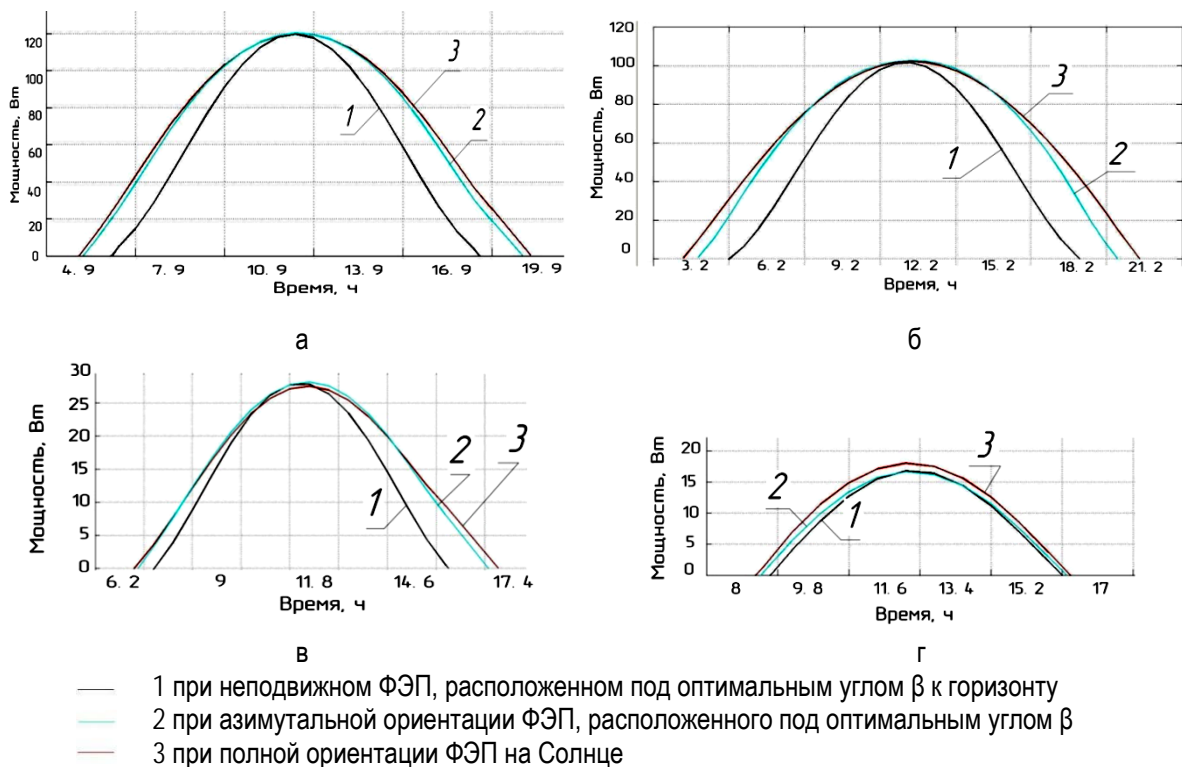


Рис. 4. Графики зависимости вырабатываемой мощности ФЭП, установленного в поселке Кушнаренково РБ: а – для 15 апреля; б – для 15 июля; в – 15 октября; г – 15 января локального солнечного времени

**Выводы.** Разработана математическая модель для определения энергетических показателей СУ с ФЭП в зависимости от внутренних и внешних факторов и степени ориентации приемной поверхности ФЭП на Солнце. Сравнение характеристик, полученных при моделировании в стандартных условиях, с паспортными характеристиками подтверждает адекватность разработанной модели. Моделирование режимов работы для произвольно выбранных дней времени года на основе данных многолетних климатических наблюдений в условиях п. Кушнаренково РБ показывает эффективность применения систем слежения за Солнцем.

Анализ энергетических показателей СУ с ФЭП с различной ориентацией на Солнце за необходимый период времени позволит дать оценку о целесообразности применения систем слежения в данных установках.

### Литература

1. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких, Ю.Д. Арбузов [и др.]. – СПб.: Наука, 2002. – С. 27–33, 39–41.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
3. Справочник по климату СССР. Вып. 9. Ч. 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – 2-е изд. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 70 с.
4. Справочник по климату СССР. Вып. 9. Ч. 2. – Л., 1965. – 362 с.
5. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 77–80.
6. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 126–128.
7. Ярмухаметов У.Р., Ахметшин А.Т. Определение значений интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды для моделирования работы солнечных установок // Мат-лы VI Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых (10 декабря 2013 г.). – Уфа: Изд-во Башкир. ГАУ, 2013. – С. 211–214.