

МОДЕЛИРАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ

Петър Иванов, Галина Чернева

lz1pgi@gmail.com, cherneva@vtu.bg

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”

гр. София, ул. „Гео Милев” 158

РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: фотоволтаичен панел, симулационен модел, Matlab/Simulink, волт-амперна характеристика

Резюме: В условията на съвременната енергийна криза расте необходимостта от евтини енергийни източници. Слънчевата енергия е една добра и достъпна алтернатива на сегашните горива, което води до увеличено изграждане на фотоволтаични системи. Технологиите, използвани в слънчевата енергетика, са ориентирани най-общо към производство на топлина или на електрически ток. Най-важният елемент на една слънчева система е фотоволтаичният панел. В него се извършва преобразуване на слънчевото лъчение в топлина или електричество. От ефективната му и надеждна работа зависи качеството на цялата система и количеството на получената енергия. На пазара съществува голямо разнообразие от материали, размери и характеристики на фотоволтаичните панели. Именно тази конкурентност между различните видове фотоволтаици е една от главните причини да се търсят оптималните технически и инвестиционни решения за всеки фотоволтаичен проект. Това налага създаването на адекватни математични и симулационни модели, чрез които да се направи предварително изследване и анализ.

В настоящата работа се предлага симулационен модел на фотоволтаичен панел в среда на Matlab/Simulink, който дава възможност за предварителен анализ на характеристиките му и оценка на оптималната конфигурация от панели съобразно конкретния проект.

1. Въведение в проблема

В основата на преобразуването на слънчева енергия в електрическа е явлението фотоефект във фотоволтаичните (Photovoltaics, PV) елементи, чиято структура се базира на $p-n$ прехода. Фотоволтаичният панел се състои от няколко PV елемента, най-често свързани последователно, с цел получаване на по-високо напрежение и изходна мощност. При изграждане на фотоволтаични системи отделните панели се свързват в модули. При конструиране на даден тип модул се налага да се отчитат функционалните възможности на слънчевия фотопанел от гледна точка на електрическите параметри; условията на околната среда (температура и осветеност); фактори, свързани с конструкцията на слънчевия модул, начина на експлоатация и др.

Основна електрическа характеристика на фотоволтаичния панел е неговата максимална изходна мощност, която се отличава от действителната изходна мощност,

поради нейната зависимост от конкретните условия на работа и влияние на околната среда [1]. Изборът на PV панел, определянето на необходимия брой панели и начина на тяхното свързване още на етап идеен проект, се облекчава, ако се направи компютърно моделиране и симулация на характеристиките. Чрез симулационния модел може да се прогнозира поведението на PV системата по отношение на определени параметри на околната среда, както и да се оцени нейната производителност.

В литературата има много модели на фотоволтаични панели [2,3,4,5]. Аналитичните [2,3] се основават на заместващата електрическа схема на PV елемента, която включва диод и еквивалентни съпротивления. На нейна база се извежда уравнение за волт-амперната (VA) характеристика на елемента, в което зависимостта на изходното напрежение от температурата и осветеността е отчетена чрез съответните температурни коефициенти и константи.

Симулационен модел най-удобно се реализира в среда на Matlab/Simulink, чрез библиотека SimPowerSystems [4,5]. В настоящата работа е реализиран симулационен модел на фотоволтаичен елемент в среда на Matlab/Simulink, чрез който могат да се получат характеристиките на елемента при различни тестови условия. Моделът е реализиран за PV елемент Jinko, модел JKM440M-60HL4. Получената при симулация VA характеристика на PV елемента е сравнена с аналитично получената характеристика.

2. Аналитичен модел на PV елемент.

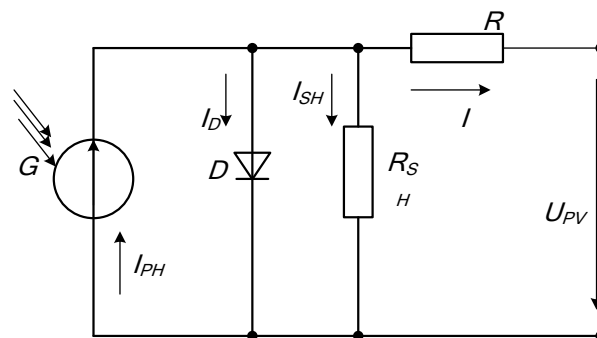
Като се има предвид, че фотоволтаичният елемент е полупроводников и принципът на действие му се основава на вътрешния фотоефект, заместващата му схема е от вида на фиг.1 [2,3], където:

R_{SH} – шунтиращо съпротивление;

R – последователно съпротивление (вътрешно съпротивление на PV елемента);

I_{PH} – фототок;

I_D – ток през диода D .



Фиг. 1. Заместваща схема на PV елемент

Токът през диода се описва със следното уравнение [6]:

$$(1) \quad I_D = I_0 \left(e^{\frac{qU}{AKT}} - 1 \right),$$

където U – приложено напрежение;

I_0 - ток на насищане на диода;

$q=1,6 \cdot 10^{-19}$, C – заряд на електрона;

$k=1,38 \cdot 10^{-23}$, J/K – константа на Болцман;

A – коефициент на идеалност на V-A характеристика, който зависи от дебелината на p - n прехода и материала. За силициеви монокристални PV елементи $A=1,2$ [6];

T – температура, $^{\circ}K$.

По първи закон на Кирхоф за схемата от фиг.1 се записва уравнението:

$$(2) \quad I_D + I_{SH} + I = I_{PH}.$$

Приложеното върху диода напрежение се определя като:

$$(3) \quad U = U_{PV} + IR,$$

а токът през R_{SH} е:

$$(4) \quad I_{SH} = \frac{U_{PV} + IR}{R_{SH}}.$$

Тогава волт-амперната характеристика на PV елемента се определя с уравнението:

$$(5) \quad I = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{q(U_{PV} + IR)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{U_{PV} + IR}{R_{SH}}.$$

Поради голямата стойност на R_{SH} на силициевите диоди, последният член в уравнение (5) може да се пренебрегне.

I_{PH} може да се определи чрез тока на късо съединение I_{SC} на PV елемента при различни условия на температура и осветеност.

Сред каталожните данни за всеки фотоволтаичен панел е $I_{SC_{STC}}$ при стандартни тестови условия (Standart Test Conditions - STC), които се отнасят за интензитет на слънчево греене $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$, температура $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$ (298°K) и коефициент на въздушната маса 1,5. Според [7], фототокът за всяка друга температура T и слънчево греене G се определя като:

$$(6) \quad I_{PH} = \left[I_{SC_{STC}} + \alpha(T - T_{STC}) \right] \frac{G}{G_{STC}}$$

където α , A/K е температурен коефициент на тока на късо съединение и се дава от производителя.

Токът на насищане на диода може да се получи от уравнение (5), записано за режима на празен ход ($I=0$):

$$(7) \quad I_0 = \frac{I_{PH}}{e^{\frac{q[U_{OC_{STC}} + \beta(T - T_{STC})]}{AKT}} - 1}},$$

където β , V/K е температурен коефициент на напрежението на празен ход (от спецификацията на PV елемента,

$U_{OC_{STC}}$ е напрежение на празен ход при стандартни тестови условия.

Следователно уравнения (5), (6) и (7) определят волт-амперната характеристика на PV елемента.

Тези уравнения са използвани за получаване на VA характеристика на монокристален фотоволтаичен панел Jinko, модел JKM440M-60HL4, с каталожни данни, дадени в табл.1.

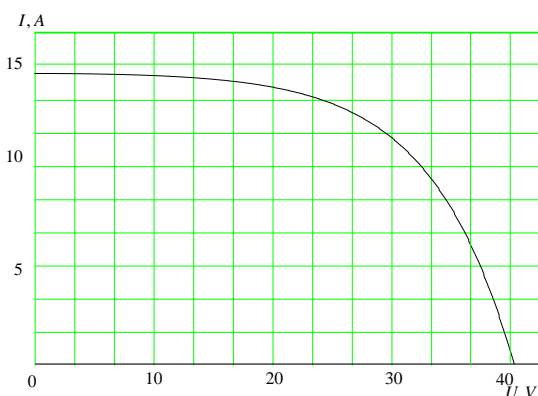
Табл. 1

Тестови условия	STC	NOCT
Максимална мощност P_{max}, Wp	440	327
Напрежение на празен ход V_{oc}, V	41,18	38,87
Ток на късо съединение I_{sc}, A	13,73	11,09
Напрежение при максимална мощност V_{mp}, V	33,72	31,39

Ток при максимална мощност I_{mp} , A	13,05	10,43
температурен коефициент на напрежение на празен ход	-0,28%/°C	
температурен коефициент на ток на късо съединение	0,048%/°C	
вътрешно съпротивление R , Ω	0,204	

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) е номинална работна температура на клетката. NOCT включва слънчево греене от 800 W/m^2 , температура на околната среда 20°C и вятър със скорост $1,5 \text{ m/s}$.

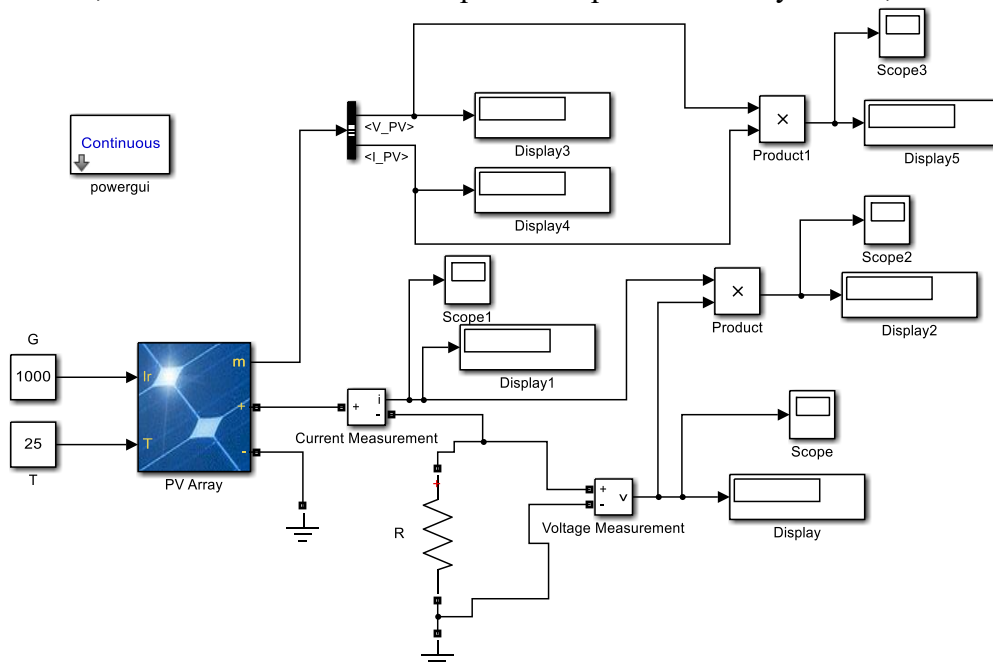
Получената VA характеристика на PV панел JKM440M-60HL4 за STC е дадена на фиг.2.



Фиг.2. Аналитична VA характеристика на PV панел JKM440M-60HL4 за STC

3. Симулационен модел на PV елемент

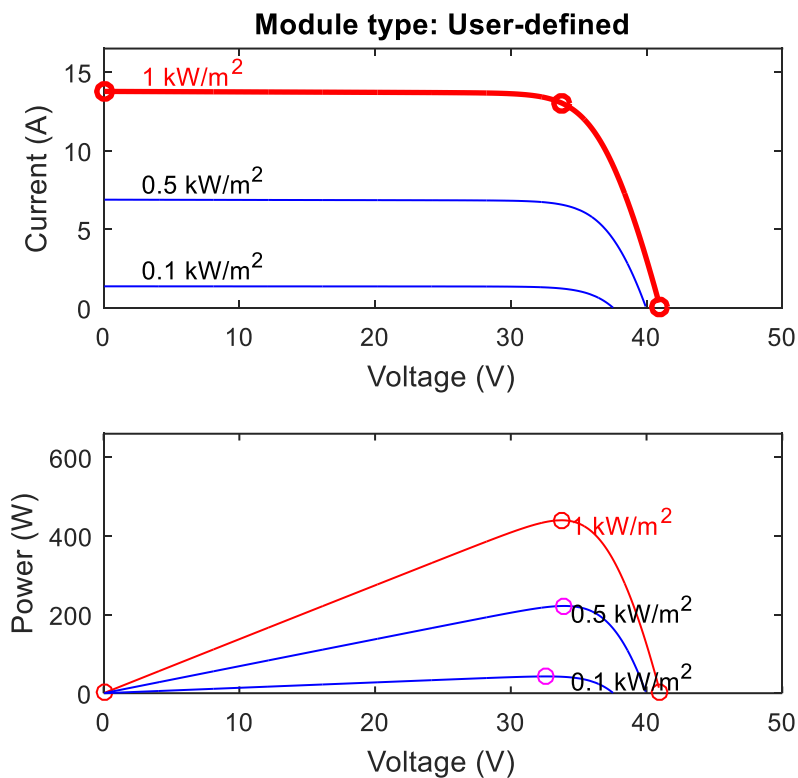
Симулационният модел на PV елемент в среда на Matlab/Simulink е даден на фиг. 3. На блока PV Array, симулиращ елемента, са зададени параметрите на фотоволтаичен елемент Jinko, модел JKM40M-60HL4 при стандартни тестови условия, дадени в табл. 1.



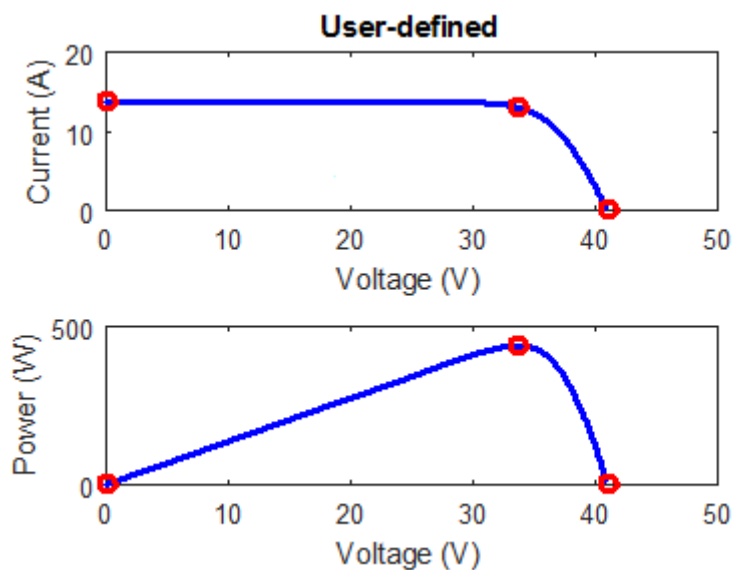
Фиг.3. Симулационен модел на PV елемент в Matlab/Simulink

При симулацията са получени VA характеристика и зависимостта на мощността от тока при три стойности на интензитета на слънчево греене ($1000, 500$ и 100 W/m^2), които са дадени на фиг.4. На фиг.5 е дадена VA характеристика на панел при стандартни тестови условия, получена чрез симулацията.

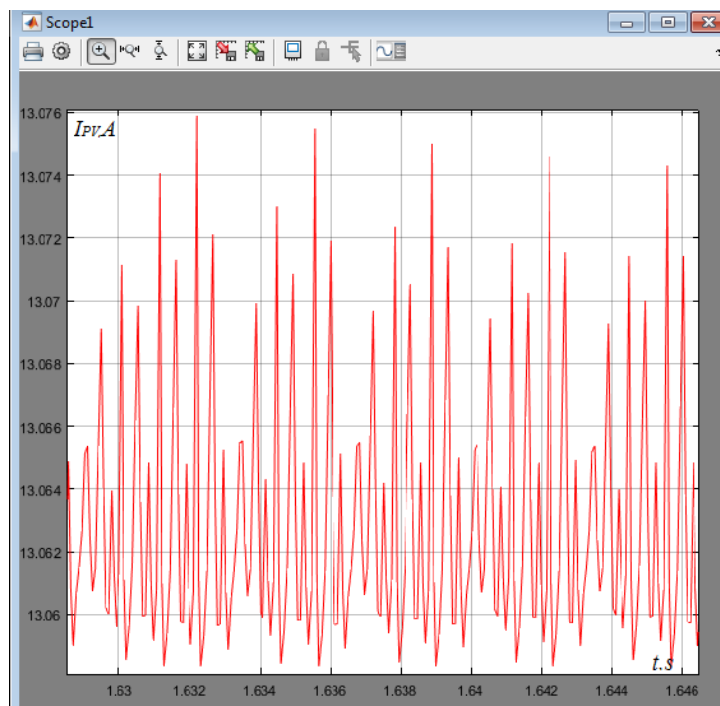
Чрез предложения модел могат да се снемат зависимостите на тока, напрежението и мощността от времето, както е показано на фиг.6.



Фиг.4. Симулационни характеристики $I=f(U)$ и $P=f(U)$ на PV елемент JKM40M-60HL4 при различен интензитет на слънчево греене



Фиг.5. Симулационна VA характеристика на PV панел JKM440M-60HL4 за STC



Фиг.6. Зависимост на тока на PV елемента I_{pv} от времето

Изводи

В настоящата работа е реализиран симулационен модел на фотоволтаичен елемент Jinko, модел JKM40M-60HL4 в среда на Matlab/Simulink. Чрез него са получени зависимостите на тока и мощността на елемента от напрежението. Волт-амперната характеристика при стандартни тестови условия, получена при симулацията, е аналогична на построената по аналитични зависимости, което доказва адекватността на модела. Чрез предложения симулационен модел могат да се изследват и времевите зависимости на тока, напрежението и мощността на различни PV елементи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Krauter S. Solar electric power generation-photovoltaic energy systems. Springer, New York 74. 2006
- [2] Kamarzaman N. A., Tan C. W. A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014.
- [3] Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. G. Comprehensive Analysis of PSO and P&O for the Global Maximum Power Point Tracking of the PV under Partial Shading / 1st IEEE 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2019): Proeedings, Moscow, March 14-15, 2019. - Piscataway: IEEE, 2019
- [4] Faiza Belhachat, Cherif Larbes. Comprehensive review on global maximum power point tracking techniques for PV systems subjected to partial shading conditions // Solar Energy. 2019
- [5] Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions // Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng. 2017.
- [6] W. Shafarman and L. Stolt, Cu(In; Ga)Se₂ Solar Cells, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, 2003
- [7] W. Herrmann and W. Wiesner, "Current-voltage translation procedure for PV generators in German 1000 roofs-programme," presented at the EUROSUN Conf., Freiburg, Germany, 1996.

PHOTOVOLTAIC PANELS MODELING

Peter Ivanov, Galina Cherneva

*Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

Keywords: *photovoltaic panel, simulation model, Matlab/Simulink, volt-ampere characteristic*

Abstract: *In the conditions of the modern energy crisis, the need for cheap energy sources is growing. Solar energy is a good and affordable alternative to current fuels, leading to increased construction of photovoltaic systems. The technologies used in solar energy are generally oriented towards the production of heat or electricity. The most important element of a solar system is the photovoltaic panel. It converts solar radiation into heat or electricity. The quality of the entire system and the amount of energy received depend on its efficient and reliable operation. There is a wide variety of materials, sizes and characteristics of photovoltaic panels on the market. It is this competitiveness between different types of photovoltaics that is one of the main reasons to look for the optimal technical and investment solutions for each photovoltaic project. This necessitates the creation of adequate mathematical and simulation models, through which preliminary research and analysis can be done.*

In the present work, a simulation model of a photovoltaic panel is proposed in a Matlab/Simulink environment, which enables a preliminary analysis of its characteristics and an assessment of the optimal configuration of panels according to the specific project.