

PACS numbers: 85.30.De, 84.60.Bk

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ

С.Л. Хрипко, Г.К. Жолудєв

Класичний приватний університет,
70-б, вул. Жуковського, 69002, Запоріжжя, Україна,
E-mail: serg_992000@mail.ru

В роботі запропоновано розрахункову модель електричних характеристик сонячного елемента, яка дає змогу встановити залежності його електричних характеристик від зовнішніх умов, температури і сонячної інсоляції, а також від змінювання параметрів моделі діоду, послідовного та шунтуючого опорів. Розрахунки виконані за допомогою пакету Matlab.

Ключові слова: МОДЕЛЬ, СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ДІОД, ПАРАМЕТРИ, MATLAB.

*(Одержано 05.04.2011, у відредагованій формі – 26.10.2011,
опубліковано online – 05.11.2011)*

1. ВСТУП

У зв'язку з загостренням проблеми, пов'язанної з дефіцитом викопного пального, неурегульованості цін на нього, порушень балансу екосистеми активно виконуються розробки з пошуку високоефективних та екологічно чистих альтернативних джерел енергії. Серед відновлювальних джерел енергії ті, які базуються на фотоелектричному перетворенні сонячної енергії можна розглядати як найбільш перспективні [1]. Для перетворення сонячної енергії в електричну активно використовують фотоелектричні системи (ФЕС), які виробляють постійний електричний струм під час їх освітлення сонячними променями та перетворюють його у змінний за допомогою інвертора. Таким чином, електрична енергія може бути використана для живлення локального навантаження або перерозподілена з загальною мережею. Однією з складових ФЕС є фотоелектричні модулі (ФЕМ), які збираються з окремих фотоелектричних приладів (ФЕП) [2].

ФЕП, що перетворює енергію фотонів сонячного світла у електричну надалі будемо називати сонячним елементом (СЕ). Під дією світла у $p-n$ переході СЕ генерується напруга $0.5 \div 0.7$ В [3]. СЕ, що виготовлені на основі монокристалічного кремнію, мають краще поєднання ціна-ефективність-час експлуатації серед інших подібних елементів серійного виробництва.

В роботі повідомляється про розрахункову модель та розрахунки електричних характеристик СЕ, які були виконані за допомогою однодіодної моделі.

2. МОДЕЛЬ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

Перетворення енергії у СЕ базується на фотоелектричному ефекті, який виникає у неоднорідних напівпровідникових структурах під час дії на

них світлового випромінювання. Задана неоднорідність структури СЕ ($p-n$ перехід) може бути отримана, наприклад, за допомогою легування напівпровідника різними типами домішок (донорними або акцепторними). Кванти сонячного світла з енергією, що перевищує ширину забороненої зони напівпровідника, утворюють пари носіїв заряду [1]. Носії, які були утворені на відстані меншій за дифузійну довжину, роз'єднуються внутрішнім полем (рис. 1), причому електрони прямують до n , а дірки – до p області перепаду. Таким чином, на металевих електродах виникає різниця потенціалів, яка викликає електричний струм крізь $p-n$ перехід. Потенціальний бар'єр в структурі зменшується, що приводить до руху електричного струму від n до p області.

Розрахунки електричних характеристик СЕ здійснюються за допомогою двох основних моделей електричної схеми, а саме, однодіодної або дводіодної моделі [4]. В цій роботі повідомляється про моделювання та розрахунки ФЕМ за допомогою рівняння Шоклі для діоду. Для моделювання нами було обрано однодіодну модель (рис. 2). Вихідний струм (I_{PH}) з джерела (G) пропорційний кількості світла, що на нього падає. У відсутності освітлення СЕ працює як звичайний діод, тобто крізь нього не протікає струм. Але при поєднанні з зовнішнім джерелом він генерує струм діоду (I_D) або темновий струм. Головні параметри, що описують модель СЕ є струм насичення $I_0 = f(T)$, фотострум $I_{PH} = f(T)$, напруга холостого ходу послідовний опір R_S , шунтуючий опір R_{SH} , коефіцієнт ідеальності вольт-амперної характеристики (ВАХ) n . Для ідеального СЕ $R_S = R_{SH} = 0$ [5].

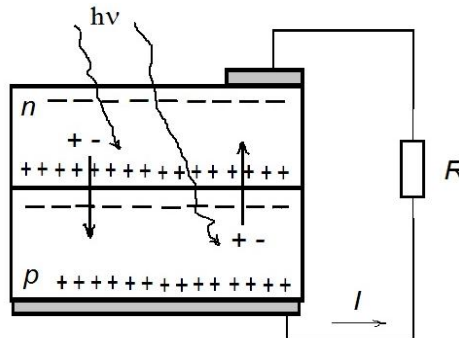


Рис.1 – Структура сонячного елемента

Для розрахунку електричних характеристик СЕ використаємо два головних параметри: струм короткого замикання (I_{SC}) та напругу холостого ходу (U_{OC}). При замиканні контактів СЕ у зовнішній мережі ($R \rightarrow 0$), вихідний струм визначається як струм короткого замикання $I_{PH} = I_{SC}$. При розімкнутій зовнішній мережі ($R \rightarrow \infty$) струм $I \rightarrow 0$, а напруга, яка утворюється у $p-n$ переході, визначається як напруга холостого ходу (U_{OC}) [6].

Загальний струм СЕ на навантаженні визначається за допомогою наступного рівняння: $I = I_{PH} - I_D - I_{SH}$. Вольт-амперна характеристика СЕ за однодіодною моделлю з врахуванням шунтуючого та послідовного опорів, набуває вигляду [7]:

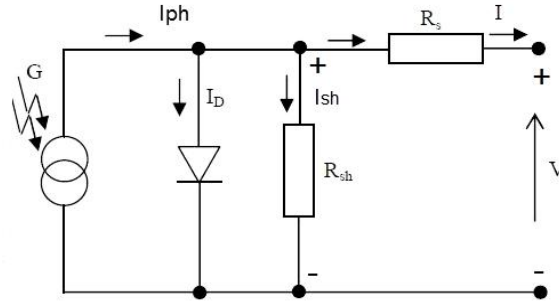


Рис. 2 – Еквівалентна схема СЕ за однодіодною моделлю

$$I = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{n k T} q\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \quad (1)$$

де V – напруга; I – струм, що протікає крізь навантаження; T – температура; n – фактор ідеальності випрямного p - n переходу; I_0 – струм насичення.

Типова ВАХ СЕ зображена на рис. 3. На ній можна виділити три головних параметра – це струм короткого замикання I_{sc} , напруга холостого ходу V_{oc} та максимальна потужність P_{max} [8].

В точці $V = V_{OC}$ вольт-амперної характеристики (рис. 3) $I = I_{SC} = 0$. Після підстановки цих параметрів у вираз (1) отримаємо:

$$0 = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{OC}}{n_0 k T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \quad (2)$$

або

$$I_{PH} = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{OC}}{n_0 k T}\right) - 1 \right] + \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \quad (3)$$

В точці $I = I_{SC}$ вольт-амперної характеристики (рис. 3) вираз (1) набуде наступного вигляду:

$$0 = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{OC}}{n_0 k T}\right) - \exp\left(\frac{qI_{SC} R_s}{n k T}\right) \right] - I_{SC} \left(1 + \frac{R_s}{R_{SH}} \right) + \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \quad (4)$$

де $n_0 \geq 1$, якщо фотострум майже весь протікає крізь p - n перехід (дифузійний струм); $n_0 \geq 2$, якщо незначний струм протікає крізь p - n перехід (низький рівень інжекції).

В точці $I = I_{max}$, $V = V_{max}$ на вольт-амперній характеристиці (рис. 3) потужність $P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$, що віддається до навантаження, набуває максимальної величини, а вираз (1) перетворюється у наступний:

$$I_{max} = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{max} + I_{max} R_s}{n_{max} k T} q\right) - 1 \right] - \frac{V_{max} + I_{max} R_s}{R_{SH}} \quad (5)$$

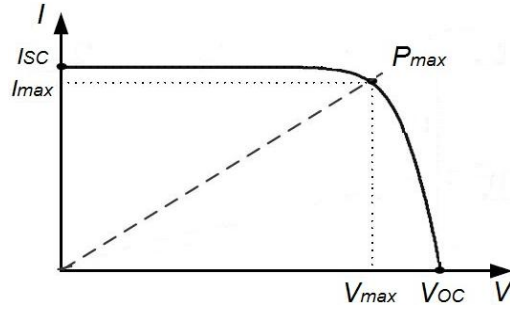


Рис. 3 – Типова ВАХ сонячного елемента

або

$$0 = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{OC}}{n_0 kT}\right) - \exp\left(\frac{V_{max} + I_{max} R_S}{n_{max} kT} q\right) \right] - I_{max} \left(1 + \frac{R_S}{R_{SH}}\right) + \frac{V_{OC} - V_{max}}{R_{SH}} \quad (6)$$

де n_{max} – фактор ідеальності у точці максимуму.

Нахил ВАХ СЕ у точці $V = V_{OC}$ може бути описаний за допомогою наступного рівняння:

$$\frac{qI_0}{n_0 kT} \exp\left(\frac{qV_{OC}}{n_0 kT}\right) = \frac{1}{R_{S0} - R_S} - \frac{1}{R_{SH}} \quad (7)$$

де n_0 та n_s фактор ідеальності діоду в точці холостого ходу і короткого замикання відповідно, $R_{S0} = -\frac{dV}{dI}\Big|_{V=V_{OC}}$ [9], а нахил ВАХ у точці $I = I_{SC}$ відповідно:

$$\frac{qI_0}{n_s kT} \exp\left(\frac{qI_{SC} R_S}{n_s kT}\right) = \frac{1}{R_{SH0} - R_S} - \frac{1}{R_{SH}} \quad (8)$$

де $R_{SH0} = -\frac{dV}{dI}\Big|_{I=I_{SC}}$ [9]. На практиці $\exp(qV_{OC}/n_0 kT) \gg \exp(qI_{SC} R_S/n_s kT)$.

За допомогою перетворень рівнянь (2)-(8) отримаємо:

$$I_{PH} = I_{SC} + \frac{I_{SC} R_S}{R_{SH}} + I_0 \left[\exp\left(\frac{qI_{SC} R_S}{n_{max} kT}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

де струм насичення $I_0 = (I_{SC} - V_{OC}/R_{SH}) \cdot \exp(-qV_{OC}/n_{max} kT)$, шунтуючий опір $R_{SH} = R_{SH0} - R_S$, послідовний опір $R_S = R_{S0} - \exp(-qV_{OC}/n_{max} kT) \times n_s kT/qI_0$, фактор якості

$$n_{max} = \frac{(V_{max} + I_{max} R_S - V_{OC}) q}{kT \ln \left[\frac{(I_{SC} - I_{max})(1 + R_S/R_{SH}) + (V_{OC} - V_{max})/R_{SH}}{I_{SC}(1 + R_S/R_{SH}) - V_{OC}/R_{SH}} \right]}.$$

Фотони, що падають на поверхню СЕ, генерують фотострум:

$$I_{PH} = [I_{PH} + K_I(T - 298)]G \quad (10)$$

де струм I_{SC} , прямо пропорційний інтенсивності освітлення G (Вт/м²) [10]: $I_{SC|G} = (G / G_0) \cdot I_{SC|G_0}$, $G_0 = 1000$ Вт/м² – потужність сонячного випромінювання при атмосферній масі АМ 1,5 і температурі 298 К, T – поточна температура СЕ, $K_I = [I_{SC}(T) - I_{SC}(25)] / (T - 25)$ (А/°С) – температурний коефіцієнт струму короткого замикання. Залежність фотоструму від температури має лінійний характер.

Треба зазначити, що зворотний струм насичення залежить від температури СЕ за формулою [11]:

$$I_0(T) = I_0(298) \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{3/n} \cdot \exp\left[qE_g / \left(nk\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right)\right], \quad (11)$$

де E_g – ширина забороненої зони напівпровідника (еВ).

Максимальну потужність, що виробляється СЕ можна оцінити за допомогою наступного виразу [8]:

$$P_{\max} = I_{\max} \cdot V_{\max} = FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC}, \quad (12)$$

де FF – коефіцієнт заповнення ВАХ СЕ.

Розрахунки характеристик СЕ було здійснене за допомогою математичного забезпечення пакету Matlab. Для моделювання були використані монокремнієві фотоперетворювачі К5М165L-N класу L263 з параметрами, які наведені в таблиці 1. Вихідні параметри сонячного елемента були виміряні за стандартними умовами: $G_0 = 1000$ Вт/м²; АМ 1,5; $T = 298$ К.

Таблиця 1 – Вихідні параметри сонячного елемента

Параметр	Позначення	Величина
Максимальна потужність	P_{\max}	$2,63 \pm 0,03$ Вт
Струм короткого замикання	I_{SC}	4,77 А
Напруга холостого ходу	V_{OC}	0,62 В
Максимальний струм	I_{\max}	4,71 А
Максимальна напруга	V_{\max}	0,53 В

3. ВПЛИВ R_S ТА R_{SH}

Згідно з рис. 2 основні втрати електричної потужності відбуваються на опорах R_S , і R_{SH} . Так, збільшення послідовного опору R_S веде до різкого погіршення форми ВАХ та зниженню вихідної потужності СЕ (рис. 4-5). Це можна помітити на збільшенні нахилу кривих біля точки V_{OC} . В той же час зменшення шунтуючого опору R_{SH} від $1K\Omega$ до 10Ω порівняно мало впливає на форму ВАХ (рис. 6-7). За розрахунками коефіцієнт ідеальності ВАХ становить $n_{\max} = 1,22$. Таким чином, для підвищення вихідної потужності СЕ треба забезпечувати підвищення R_{SH} та зменшення R_S .

Вплив інтенсивності освітлення поверхні СЕ (G). З виразу (10) випливає прямо пропорційна залежність фотоструму I_{PH} від рівня інсоляції при постійній температурі. Результати впливу G на характеристики СЕ наведені на рис. 8-9. Можна бачити, що з зростанням

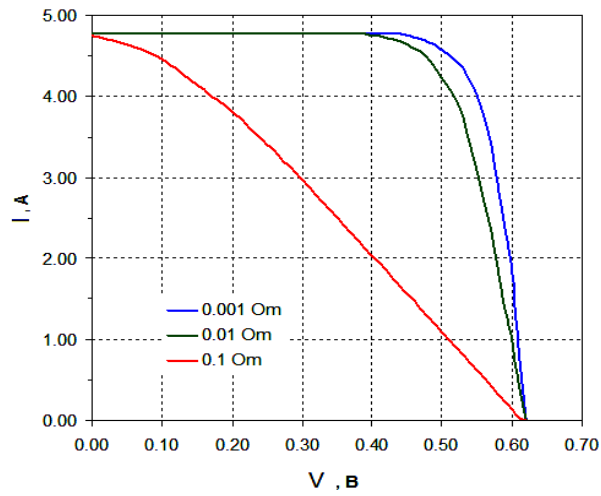


Рис. 4 – I - V характеристика СЕ при різних значеннях R_{SH}

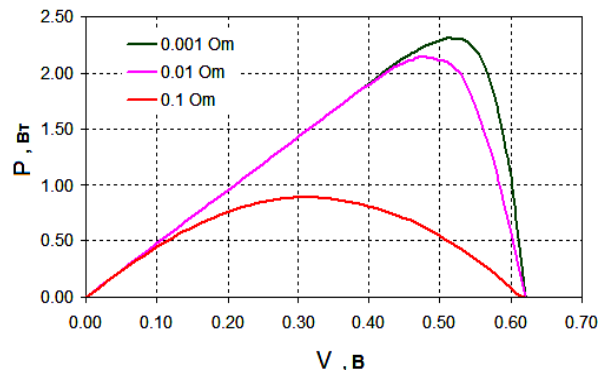


Рис. 5 – P - V характеристика СЕ при різних значеннях R_{SH}

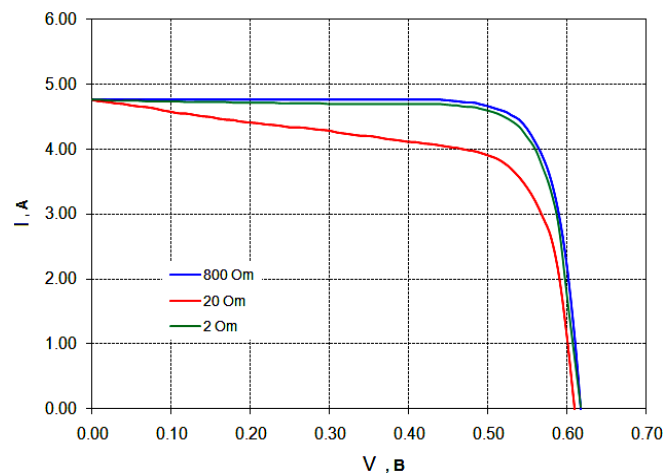


Рис.6 – I - V характеристики СЕ при різних значеннях R_S

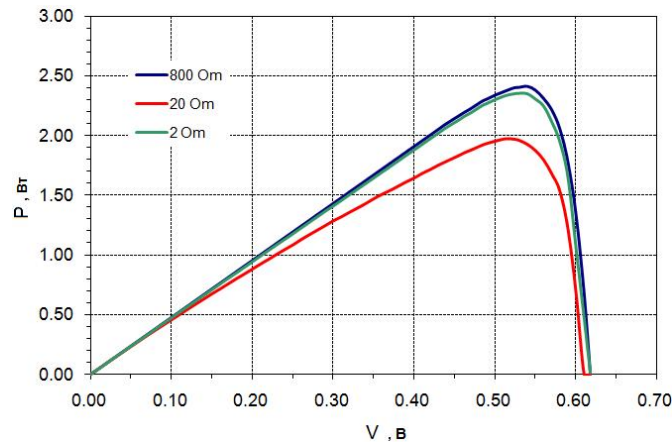


Рис. 7 – P-V характеристики СЕ при різних значеннях R_S

рівня інсоляції струм короткого замикання зростає і збільшується вихідна потужність. Це можна пояснити логарифмічною залежністю напруги холостого ходу від сонячної інтенсивності, а також струму короткого замикання від променевої енергії. Розрахунки показують, що з зростанням сонячної інтенсивності I_{SC} та V_{OC} збільшуються, але змінювання напруги холостого ходу не таке значне, як струму короткого замикання, що змінюється майже прямо пропорційно.

4. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ

Зростання температури СЕ виявляється: у незначному збільшенні струму короткого замикання відповідно з рівнянням (10); у підвищенні струму насичення відповідно з рівнянням (11); у лінійному спаді напруги холостого ходу у відповідності з залежністю $V_{OC} \propto (E_g/q) - \ln(T^3 / I_{SC})$ [3].

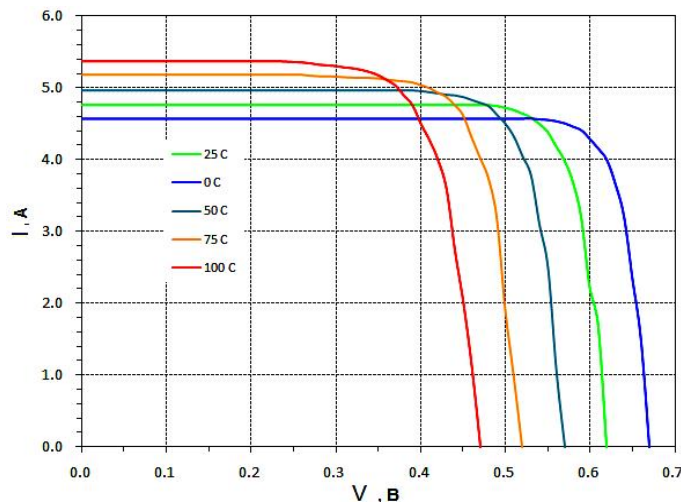


Рис. 8 – I-V характеристики СЕ при різних значеннях температури

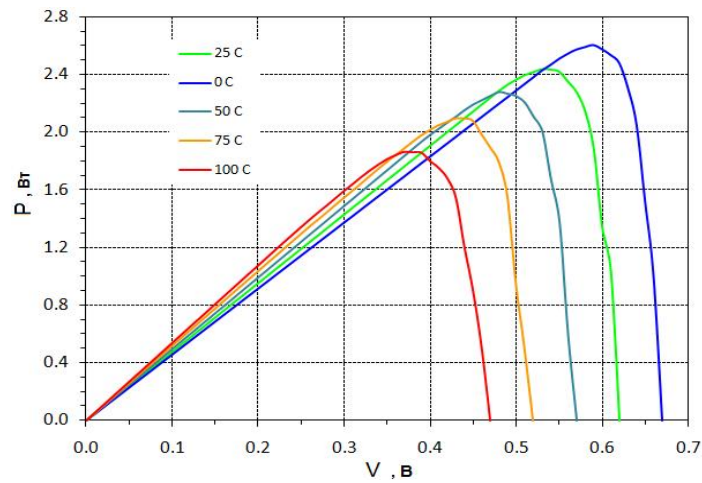


Рис. 9 – P - V характеристики СЕ при різних значеннях температури

За розрахунками: температурний коефіцієнт струму короткого замикання становить $K_I = 0.0027 \text{ A}/^\circ\text{C}$; температурний коефіцієнт напруги холостого ходу становить $K_V = 0.074 \text{ В}/^\circ\text{C}$. Результати впливу T на характеристики СЕ наведені на рис. 10-11.

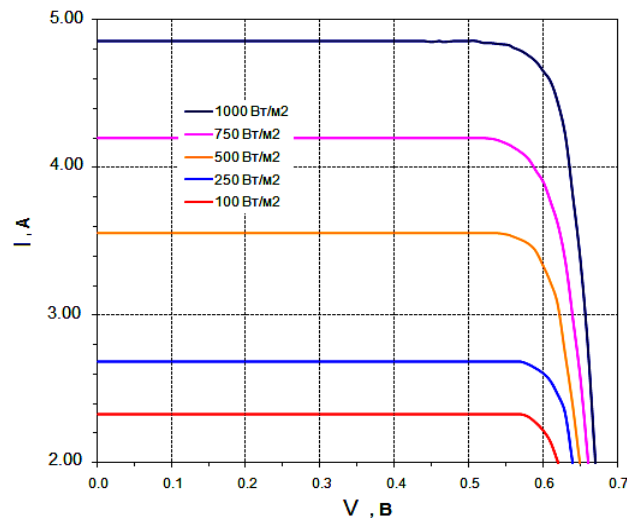


Рис. 10 – I - V характеристики СЕ при різному освітленні

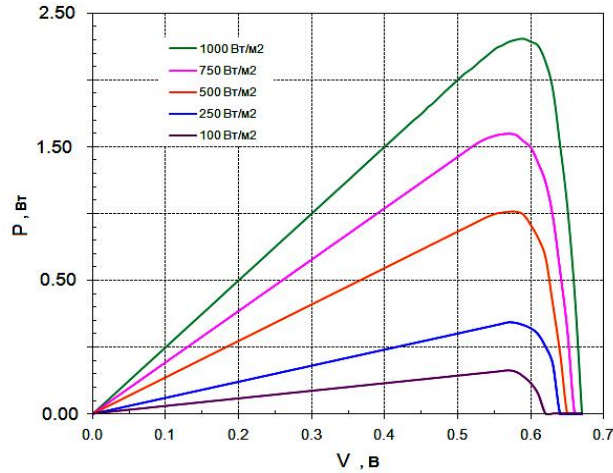


Рис. 11 – P-V характеристика СЕ при різному освітленні

5. ВИСНОВКИ

На основі розробленої моделі були виконані за допомогою пакету Matlab достатньо точні розрахунки параметрів СЕ. Розрахункові I-V та P-V характеристики показали коректні підтвержені залежності СЕ від послідовного і шунтуючого опорів, а також від впливу сонячної радіації та температури. Модель може бути використана для розрахунку і аналізу СЕ, сонячних елементів, модулів і систем.

МОДЕЛИРОВАНИЕ I-V ТА P-V ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

С.Л. Хрипко, Г.К. Жолудев

Классический приватный университет,
70-б, вул. Жуковского, 69002, Запорожье, Украина
E-mail: serg_992000@mail.ru

В работе предложена расчетная модель солнечного элемента, которая позволяет установить зависимости его электрических характеристик от внешних условий, температуры и солнечной инсоляции, а также от изменения параметров диодной модели, последовательного и шунтирующего сопротивлений. Расчеты выполнены с использованием пакета Matlab.

Ключевые слова: МОДЕЛЬ, СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ, ДИОД, ПАРАМЕТРЫ, MATLAB.

MODELING I-V AND P-V CHARACTERISTICS PHOTOVOLTAIC CELL BASED ON SILICON

S.L. Khrypko, G.K. Zholudev

Classic Private University,
70-B, Zhukovskogo Str., 69002, Zaporizhzhia, Ukraine
E-mail: serg_992000@mail.ru

Simulating model for photovoltaic cell in order to estimate electric behavior with respect changes on environmental varying parameters of temperature and solar insulation, varying diode model parameters, such as series and shunt resistance. The simulation is done with the aid of Matlab environment.

Keywords: MODEL, PHOTOVOLTAIC CELL, DIODE, OPTIONS, MATLAB.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.И. Стриха, С.С. Кильчицкая, *Солнечные элементы на основе контакта металл – полупроводник* (Санкт-Петербург: Энергоатомиздат: 1991).
2. N. Hamrouni, A. Cherif, *Int. J. Electrical Power Eng.* **1**, 307 (2007).
3. А. Фаренбрех, Р. Бьюб, *Солнечные элементы: Теория и эксперимент* (Москва: Энергоатомиздат: 1987).
4. J.A. Gow, C.D. Manning, *IEE Proc. Elec. Power Appl.* **146**, 193 (1999).
5. N. Hatzargyriou, M. Donnelly, S. Papathanassiou, J.A. Pecas-Lopes, J. Usaola, R. Lasseter, A. Efthymiadis, K. Karoui, S. Arabi, M. Takasaki, H. Chao, *Electra* **195**, 54 (2001).
6. Gilbert M. Masters, *Renewable and efficient electric power systems* (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.: 2004).
7. M. Dai, M.N. Marwali, J.W. Jung, A. Keyhani, *Proc. IEEE PES Power Syst. Conf. Expo (PSCE'04)* **1**, 398 (2004).
8. М.М. Колтун, *Солнечные элементы* (Москва: Наука: 1987).
9. Q.X. Jia, K. Ebihara, T. Ikegami, *Phil. Mag. B* **72**, 375 (1995).
10. S. Nema, R.K. Nema, G. Agnihorti, *Int. J. Energy and Environment* **1**, 487 (2010).
11. G. Walker, *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia* **21** No1, 49 (2001).