

**МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА В СПЕЦІАЛІЗОВАНОМУ ПРОГРАМНОМУ
СЕРЕДОВИЩІ MATLAB**

Д. С. Зибалов, аспірант

НТУ "Дніпровська політехніка"

E-mail: kapetal@i.ua

Анотація. *Модель сонячного фотоелектричного перетворювача (СФП) на основі моделі одного діода, з урахуванням шунтованого та послідовного опорів, фотоструму та зворотного струму діода, використовується для аналізу електричних характеристик СФП, визначення точки максимальної потужності (MPPT) за змінних умов освітлення та температури. Модель реалізована у середовищі MATLAB, що забезпечує можливість простої симуляції фізичних процесів у фотоелектричних комірках.*

Запропонований метод дозволяє отримувати точні вольт-амперні характеристики, враховуючи температуру й освітлення СФП. Реалізація моделі в MATLAB спрощує і прискорює використання для дослідження алгоритмів MPPT та автономних фотоелектричних систем. Використовується вбудований алгоритм MATLAB для обчислення струму, так як рівняння одного діода є трансцендентним і нелінійним відносно струму, та прямі аналітичні методи його не розв'язують.

Одержані результати збільшать швидкість отримання вольт-амперних характеристик СФП і визначення точки максимальної потужності без необхідності проведення тривалих експериментальних вимірювань. Це дозволить прискорити розробку й оптимізацію автономних та інтегрованих фотоелектричних систем, оцінювати ефективність роботи СФП за різних умов, а також спростити тестування та верифікацію алгоритмів MPPT у середовищі MATLAB.

Ключові слова: *сонячний фотоелектричний перетворювач, опір, вольт-амперна характеристика, джерело напруги, математична модель*

Актуальність. *Модель одного діода застосовується для математичного і чисельного опису роботи сонячного фотоелектричного перетворювача (СФП) та дозволяє прогнозувати їх електричні характеристики в різних умовах експлуатації [1].*

Аналіз останніх досліджень та публікацій. *У роботах, присвячених цій темі, детально розглянуто математичні рівняння, необхідні для побудови вольт-амперних*

характеристик, та показано застосування методу Ньютона–Рафсона для чисельної оцінки струму фотокомірки [2]. Порівняння різних підходів до моделювання СФП і розрахунку струму підкреслює складність задачі: рівняння одного діода є трансцендентним та нелінійним відносно струму, що зумовлює необхідність застосування надійних чисельних або аналітичних методів [3]. Окремі дослідження пропонують аналітичні розв'язки з використанням, зокрема, функції Ламберта і деталізують еквівалентну схему СФП з урахуванням впливу освітленості на параметри p–n переходу [4].

Мета дослідження - дослідити модель СФП на основі одного діода з урахуванням фізичних параметрів СФП для отримання точних вольт-амперних характеристик СФП та знайти точку максимальної потужності для конкретного випадку.

Матеріали та методи дослідження. Для проведення дослідження використовується модель одного діода, що враховує фотострум, зворотний струм діода, послідовний та шунтовий опори. Відбувається визначення параметрів СФП. Фотострум розраховується з урахуванням освітленості і температури. Зворотний струм оцінюється на основі паспортних даних панелі та температурної залежності. Теплова напруга враховує температуру комірок і коефіцієнт ідеальності діода. Вольт-амперна характеристика обчислюється чисельно для заданого набору напруг. Визначається точка МРРТ.

Модель одного діода (Single Diode Model) базується на еквівалентному колі одного діода і враховує такі параметри як короткозамкнений струм, напруга холостого ходу, фактор форми та ідеальний фактор перетворення. За моделлю одного діода еквівалентну схему можна представити у вигляді схеми, яка складається з джерела енергії, діода і двох резисторів (рис.1).

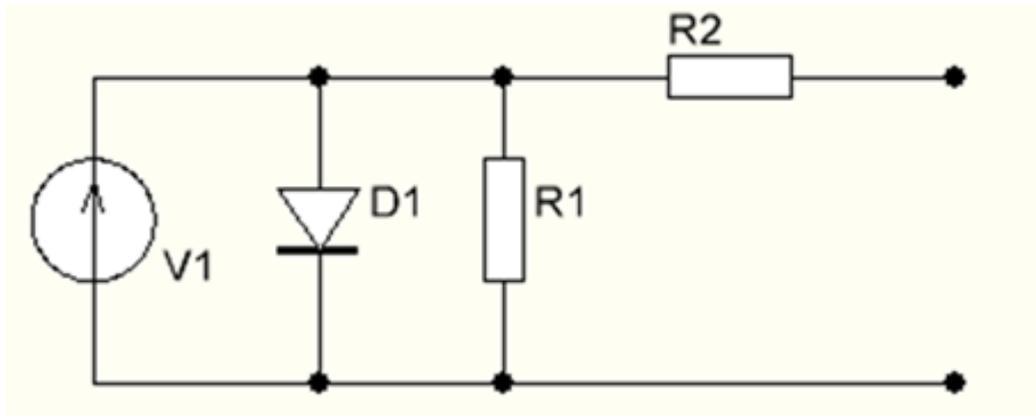


Рис 1. Еквівалентна схема математичної моделі одного діода

Така модель використовується для моделювання роботи одного сонячного модуля. Модель одного діода дозволяє прогнозувати електричні параметри сонячного модуля за різних умов, таких як рівень освітленості, температура та навантаження.

У моделі одного діода струм СФП можна визначити за формулою:

$$I = I_L - I_0 * (\exp(\frac{V + I * R2}{n * V_t}) - 1) - \frac{V + I * R2}{R1}, \quad (1)$$

де I - струм панелі, I_L - фотострум, I_0 - зворотний струм діода, $R2$ - послідовний опір, $R1$ - шунтовий опір, n - коефіцієнт ідеальності діода, V_t - теплова напруга.

Фотострум можна розрахувати за формулою:

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} * (I_{SC} + k_I * (T_{cell} - T_{ref})), \quad (2)$$

де G - поточна інсоляція, G_{ref} - опорна інсоляція (1000 Вт/м²), I_{SC} - струм короткого замикання, k_I - температурний коефіцієнт фотоструму, T_{cell} - температура комірки, T_{ref} - температура за стандартних умов.

У моделі одного діода зворотний струм діода можна розрахувати за формулою:

$$I_0 = \frac{I_{SC} - I_{mp}}{\exp(\frac{q * V_{oc}}{n * k * T}) - 1}, \quad (3)$$

де I_{SC} - паспортний струм короткого замикання, I_{mp} - струм у точці генерації максимальної потужності, V_{oc} - напруга холостого ходу, q - заряд електрона, k - стала Больцмана, T - температура в кельвінах, n - ідеальність діода.

Результати досліджень та їх обговорення. Моделювання фотоелектричних перетворювачів передбачає попередню підготовку вхідних параметрів, без яких неможливо забезпечити адекватність розрахунків. Спочатку визначаються номінальні характеристики СФП. Напруга холостого ходу і струм короткого замикання можна знайти на шильдику на зворотній стороні СФП. Напругу і струм у точці максимальної потужності треба виміряти. Для цього необхідно забезпечити попадання сонячних променів під прямим кутом на поверхню СФП. Коефіцієнти температурної залежності можна тільки отримати в документації на СФП. На рис. 2 наведено текст програми MATLAB з основними параметрами.

```
I = 9.5;           % A - струм короткого замикання
V = 37.0;         % В - напруга холостого ходу
np = 60;          % Кількість послідовно з'єднаних комірок
R2 = 0.30;        % Ом - послідовний опір
R1 = 500.0;       % Ом - шунтовий опір
G = 1000;        % Вт/м^2 - сонячна інсоляція
tC = 20;          % °C - температура навколишнього середовища
NOCT = 45;        % °C - номінальна робоча температура комірки
Te = 298.15;     % °C - еталонна температура комірки 25°C
k = 1.380e-23;   % Дж/К - стала Больцмана
q = 1.602e-19;   % Кл - заряд електрона
E = 1.12;        % eВ - ширина забороненої зони Si
n = 1.3;         % Коефіцієнт ідеальності діода
kI = 0.0005*I;   % А/К - вплив температури на I
```

Рис. 2. Параметри СФП

Код програми MATLAB розрахунку основних параметрів приведено на рис. 3. Спочатку проводиться розрахунок фотоструму та зворотного струму діода за формулами (2) та (3). Далі проводиться розв'язок нелінійного рівняння моделі одного діода. Розв'язати це рівняння можна за допомогою вбудованого метода MATLAB `fzero` чи використати метод Ньютона для визначення струму при заданій напрузі.

```

TK = tC + (NOCT - 20)/800 * G + 273.15; % Температура комірки (модель NOCT)
IL = (I + kI*(TK - Te)) * (G/1000); % фотострум IL
Vt_cell = k*TK/q; % Теплова напруга для 1 комірки
Vteplova = n * np * Vt_cell; % Ефективна теплова напруга для всієї панелі
Vt_ref = n * np * (k*Te/q); % Теплова напруга при STC
I0_ref = I / (exp(V / Vt_ref) - 1); % I0 при STC
I0 = I0_ref * (TK/Te).^3 .* exp( (q*E/k) * (1/Te - 1/TK) ); %Поправка на температуру
Voc_est = Vteplova * log(IL/I0 + 1); % Наближена напруга холостого ходу
V = linspace(0, 1.1*Voc_max, 300).'; % Генерує масив від 0 до трохи більше Voc
I = zeros(size(V)); % Масив для струмів
for i = 1:length(V) % Розрахунок струму для ВАХ через fzero
    Vk = V(i); % Поточна напруга на панелі
    f = @(Ik) Ik - IL + I0*(exp((Vk + Ik*R2)/Vteplova) - 1) + (Vk + Ik*R2)/R1; % Визначаємо функцію f(I)
    if i == 1 I(i) = fzero(f, IL); else I(i) = fzero(f, I(i-1));
    end
    I(i) = max(I(i),0); %Обмеження струму нулем
end
m = find(I <= 1e-6, 1, 'first'); %Видалення зайвих значень
if ~isempty(m) V = V(1:m); I = I(1:m);
end
P = V .* I; % Потужність
[Pmpp, j] = max(P); % Максимальна потужність і індекс
Vmpp = V(j); % Напруга MPPT
Impp = I(j); % Струм MPPT

```

Рис. 3. Розрахунки

Код програми MATLAB для побудови графіків наведено на рис. 4. Виконується побудова двох графіків. Червоною крапкою позначено точку максимальної генерації потужності (MPPT) для заданих умов.

```

figure('Position',[100 100 1000 400]);
subplot(1,2,1); % ВАХ
title('ВАХ');
plot(V, I, 'b','LineWidth',2); grid on; hold on;
plot(Vmpp, Impp,'sr','MarkerFaceColor','r'); % точка MPPT
xlabel('Напруга V, В'); ylabel('Струм I, А');
subplot(1,2,2); % ВтВХ
title('ВтВХ');
plot(V, P,'m','LineWidth',2); grid on; hold on;
plot(Vmpp, Pmpp,'sr','MarkerFaceColor','r'); % точка MPPT
xlabel('Напруга V, В'); ylabel('Потужність P, Вт');

```

Рис.4 Побудова графіків

Графіки вольт-амперної характеристики та максимальної потужності наведено на рис. 5.

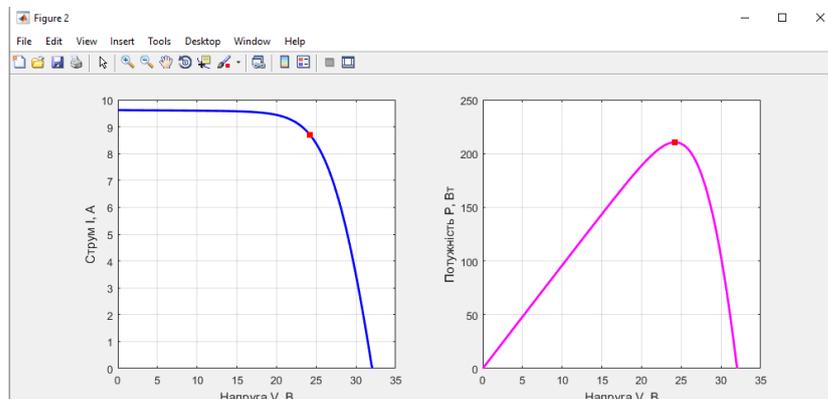


Рис.5. Графіки ВАХ і максимальної потужності

Висновки та перспективи. Перевагою цього метода є отримання якісного відтворення вольт-амперних та потужнісних характеристик СФП в умовах зміни інтенсивності інсоляції та температури. Встановлено, що фотострум залежить від інтенсивності світлового потоку і температури. Ці фактори впливають на ефективність перетворення енергії. Зокрема, неконтрольований відбір енергії може призвести до зниження максимальної потужності за рахунок перевищення потужності навантаження (потужність, яку генерує СФП). При цьому можливе зниження значення генерованої потужності до нуля. Наукова новизна дослідження полягає у використанні результатів моделювання для побудови алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (MPPT) та дослідженні метео впливу на ефективність роботи СФП. Практичне значення роботи визначається можливістю використання отриманих результатів при моделюванні для розробки інтелектуальних систем керування відбором потужності від СФП. Таким чином, модель одного діода дозволить підвищити ефективність подальших досліджень чи вдосконалити інтелектуальні системи керування відбором енергії СФП.

Список використаних джерел

1. Vivek Tamrakar, S.C. Gupta and Yashwant Sawle. Single-diode pv cell modeling and study of characteristics of single and two-diode equivalent circuit. Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ). 2015. Vol 4, No 3, Available at: <https://doi.org/10.14810/elelij.2015.4302>
2. Muhyaddin Rawa, Martin Calasan et al. Single Diode Solar Cells—Improved Model and Exact Current–Voltage Analytical Solution Based on Lambert’s W Function. Sensors 2022, 22, 4173. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22114173>
3. H. A. Koffi, E. A. Armah, K. Ampomah-Benefo1, D. Dodoo-Arhin. A Step by Step Analytical Solution to the Single Diode Model of a Solar Cell. NUST Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol. 15, No. 2. Available at: <https://doi.org/10.24949/njes.v15i2.728>
4. Колонтаєвський Ю. П., Тугай Д. В., Котелевець С. В. Фотоенергетика. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 160 с.

References

1. Vivek Tamrakar, S.C. Gupta and Yashwant Sawle (2015). Single-diode pv cell modeling and study of characteristics of single and two-diode equivalent circuit. Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ), 4 (3). Available at: <https://doi.org/10.14810/elelij.2015.4302>

2. Muhyaddin Rawa, Martin Calasan et al. (2022). Single Diode Solar Cells—Improved Model and Exact Current–Voltage Analytical Solution Based on Lambert’s W Function. *Sensors*, 22, 4173. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22114173>

3. H. A. Koffi, E. A. Armah, K. Ampomah-Benefo1, D. Doodoo-Arhin. (2022). A Step by Step Analytical Solution to the Single Diode Model of a Solar Cell. *NUST Journal of Engineering Sciences*, 15 (2). Available at: <https://doi.org/10.24949/njes.v15i2.728>

4. Kolontaevsky Yu. P., Tugay D. V., Kotelevets S. V. (2019). *Fotoenerhetyka [Photoenergetics]*. Kharkiv: KhNUMG named after O. M. Beketov, 160.

MODELING OF A SOLAR PHOTOVOLTAIC CONVERTER IN THE SPECIALIZED MATLAB SOFTWARE

D. Zibalov

Abstract. *The developed model of a solar photovoltaic converter (SPC) based on a single-diode model, taking into account shunt and series resistances, photocurrent, and diode reverse current, is used for analyzing the electrical characteristics of the SPC and determining the maximum power point (MPPT) under varying illumination and temperature conditions. The model is implemented in the MATLAB environment, providing the capability for straightforward simulation of physical processes in photovoltaic cells.*

The proposed method allows obtaining accurate current-voltage characteristics, taking into account the temperature and illumination of the SFC. The implementation of the model in MATLAB simplifies and accelerates its use for the study of MPPT algorithms and autonomous photovoltaic systems. The built-in MATLAB algorithm is used to calculate the current, since the equation of one diode is transcendental and nonlinear with respect to current, and direct analytical methods do not solve it.

The results obtained will increase the speed of obtaining current-voltage characteristics of the SFC and determining the maximum power point without the need for lengthy experimental measurements. This will accelerate the development and optimization of autonomous and integrated photovoltaic systems, evaluate the efficiency of the SFP under various conditions, and also simplify testing and verification of MPPT algorithms in the MATLAB environment.

Key words: *solar photovoltaic converter, resistance, current-voltage characteristic, voltage source, mathematical model*