

МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

*У статті розглянуті моделі фотоелектричних перетворювачів, для яких побудовані основні характеристики. Проведено порівняння характеристик моделі з експериментально отриманими даними для сонячної батареї УН116*116-12А/В250. Отримані результати можуть бути використані в подальшому для побудови систем слідування за точкою максимальної потужності.*

Постановка проблеми.

На сьогоднішній день перед енергетикою стоїть багато проблем і найбільш гостра серед них – проблема її джерел. Близько 90% енергії ми отримуємо за рахунок джерел, які є невідновлювальними або екологічно брудними. Споживання енергії постійно зростає, в той час як запаси органічних джерел постійно зменшуються. За різними прогнозами, їх може вистачити від декількох десятків до сотні років. Атомна енергетика, запасів палива для якої вистачить на більший час, після подій 1986 року не розглядається як основний постачальник енергії. В зв'язку з цим постійно зростає увага до альтернативних джерел енергії, серед них однією з найбільш перспективних є енергія сонця, яка є майже невичерпною. Для перетворення енергії сонця в електричну енергію застосовують фотоелектричні перетворювачі, які з'єднуючи послідовно або паралельно об'єднують в сонячні батареї (СБ) [1].

Фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) – пристрої на основі напівпровідникових фотоелементів, призначені для перетворення сонячної енергії в електричну, які використовуються в якості джерел живлення електронних систем. Вони широко застосовуються як в космічній так і в наземній енергетиці.

Основною характеристикою сонячної батареї є вольт-амперна характеристика (ВАХ), на основі якої можна побудувати залежність потужності, яка віддається в навантаження від напруги. ВАХ СБ є суттєво нелінійною (рис. 1) [1], і залежить як від потужності сонячного випромінювання W , так і від температури T р-п переходу СБ. Зазначена нелінійність призводить до того, що точка максимальної потужності (A на рис. 1) буде змінювати своє положення при зміні часу доби або погодніх умов, і, відповідно, змінюватиметься оптимальне навантаження $R_{H\text{ OPT}}$ при якому від СБ відбиратиметься максимальна потужність P_{MAX} . Зрозуміло, що підключення СБ напряму до навантаження з незмінним опором призведе до неефективного використання батареї, тому для їх більш ефективного використання навантаження повинно підключатись через систему слідування за точкою максимальної потужності (ССТМП). Основною задачею даної системи є максимально швидко вивести робочу точку ФЕП в точку максимальної потужності A (ТМП), та підтримувати її в ній при зміні потужності сонячного випромінювання та температури. Застосовуючи ФЕП з ССТМП, яка працює за певним алгоритмом, можна суттєво підвищити ефективність їх використання, що є дуже важливим, враховуючи їх відносно невеликий коефіцієнт корисної дії [2,0,4].

Розробка ССТМП є досить складним процесом, для реалізації якого необхідно знати ВАХ ФЕП та діапазон зміни рівня потужності сонячного випромінювання в регіоні, де буде використовуватись система. Отримати ВАХ ФЕП можна аналітично, шляхом моделювання та фізичного експерименту. Ускладнює поставлену задачу той факт, що зазвичай підприємства-виробники сонячних батарей в довідникових даних не наводять ВАХ, а обмежуються лише її максимальними параметрами – напругою холостого ходу $U_{ХХ}$ та струмом короткого замикання $I_{КЗ}$. Саме тому під час розробки ССТМП доцільно разом з моделями використовувати експериментально отримані дані.

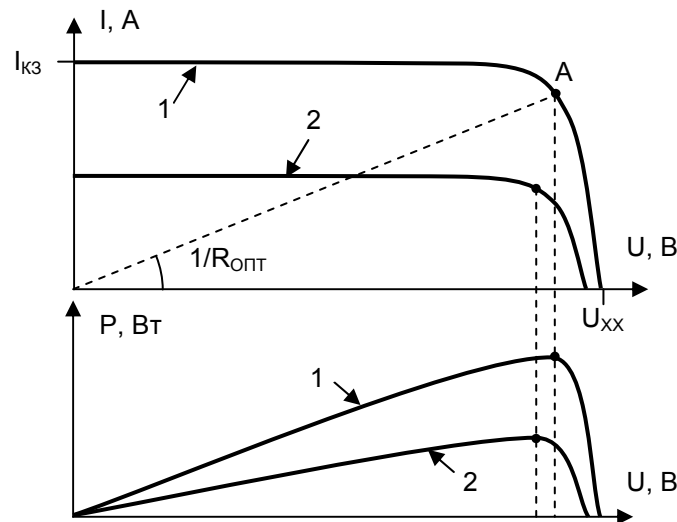


Рис. 1. Положення точки максимальної потужності на ВАХ та характеристики потужність - напруга сонячної батареї

Враховуючи важливість ВАХ для побудови ССТМП, моделюванню та аналітичним розрахункам присвячена велика кількість наукових публікацій [0,5,6]. Основна увага в них відводиться отриманню математичних моделей СБ [5,6], та використанню отриманих ВАХ для побудови ССТМП [0]. Однак, в розглянутих роботах як правило наводяться результати лише для СБ певних виробників, які дуже важко придбати в Україні, або ж вони коштують дорожче наявних на нашому ринку аналогів.

Цілі статті.

Метою роботи є отримання аналітичної та змодельованої в пакеті Matlab ВАХ сонячної батареї (УН116*116-12А/В250), які можна було б використати для розробки ССТМП, а також їх порівняння з характеристиками, отриманими експериментально.

Схема заміщення фотоелементу.

СБ складається з сукупності фотоелементів, з'єднаних між собою певним чином. Спосіб підключення (паралельно, послідовно) можна легко врахувати, тому для початку знайдемо математичний опис і проведемо моделювання для одного фотоелементу. Модель повинна точно описувати ВАХ реальної СБ та її залежність від температури та потужності сонячного випромінювання.

Оскільки фотоелемент фактично є р-п структурою, то широкого розповсюдження знайшли моделі, основані на ідеальному діоді (рис.2) [7]. Джерело струму J моделює створений у фотогальванічному елементі струм, який викликаний дією фотонів. При постійній температурі та потужності сонячного випромінювання він постійний, і на еквівалентній схемі заміщення позначається, як I_{ϕ} .

Навантаження, яке підключається до фотоелементу, на схемі позначено як R_H , а струм, який по ньому протікає – I_H . У випадку короткого замикання навантаження ($R_H=0$) $I_\Phi=I_H=I_{K3}$, тобто, весь струм утворений фотоелементом йде до навантаження. Однак, падіння напруги при цьому буде дорівнювати нулю. При збільшенні опору R_H , падіння напруги на діоді VD буде збільшуватися, і при певному значенні R_H діод почне відкриватись, що призведе до зменшення струму в навантаженні I_H . При холостому ході на навантаженні ($R_H=\infty$) весь струм буде протікати через діод ($I_D=I_H$), а падіння напруги буде дорівнювати напрузі на відкритому діоді U_{XX} , для кремнієвих фотоелементів $U_{XX}\approx 0,6\text{В}$. В залежності від фотоелементу та зовнішніх факторів (температура, потужність сонячного випромінювання), існуватиме оптимальне співвідношення напруги та струму, при якому їх добуток буде максимальним (опір навантаження $R_{H\text{ опт}}$).

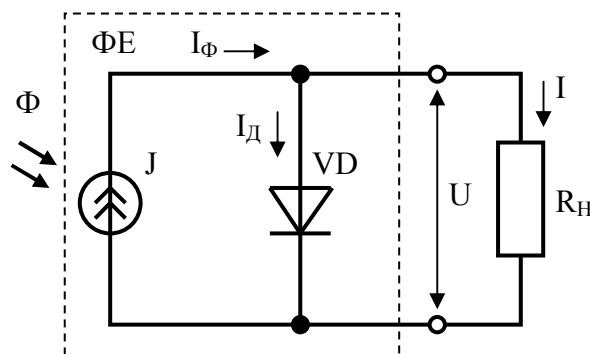


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення фотоелемента

Вихідний струм фотоелементу, у відповідності до рисунку 2, можна знайти за законом Кірхгофа:

$$I = I_{K3} - I_D. \quad (1)$$

де I – вихідний струм фотоелемента,

I_{K3} – струм короткого замикання фотоелементу, наводиться в довідкових даних,

I_D – струм діоду еквівалентної схеми заміщення.

Струм, який протікає через діод [1]:

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (2)$$

де I_0 – зворотний струм насичення діоду,

q – заряд електрона,

U – вихідна напруга фотоелементу,

k – постійна Больцмана,

T – температура р-n переходу.

Заміняючи I_D із рівняння (1) на рівняння (2), отримуємо зв'язок між I та U фотоелемента:

$$I = I_{K3} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right). \quad (3)$$

Зворотній струм насичення діода (I_0) є константою при постійній температурі і його можна знайти з режиму холостого ходу. З формули (3) при $I=0$ знайдемо:

$$I_0 = \frac{I_{K3}}{\left(\frac{U}{e^{\varphi_T}} - 1 \right)}. \quad (4)$$

З формули (4) можна знайти U_Φ – фото-ЕРС:

$$U_\Phi = \varphi_T \cdot \ln \left(\frac{I_{K3}}{I_0} + 1 \right), \quad (5)$$

Потік фотонів генерує струм, який еквівалентний I_{K3} і прямо пропорційний потужності сонячного випромінювання W [1]. Таким чином, якщо значення I_{K3} відоме з документації при стандартних умовах (I_{K3W_0} при $W_0=1000$ Вт/м² та сонячному спектрі АМ 1,5 – на широті 45°), то потік фотонів при іншому значенні W (Вт/м²) створюватиме струм I_{K3W} :

$$I_{K3W} = \frac{W}{W_0} \cdot I_{K3W_0}. \quad (6)$$

Побудуємо ВАХ ФЕ сонячної батареї з наступними параметрами [8]: $I_{K3}=0.275$ А, $U_{ХХ}=14.4$ В, $N=24$ (кількість фотоелементів у панелі), $U_{ХХ\text{ ФЕ}}=0,6$ В (напряга холостого ходу одного фотоелементу).

За допомогою формули (4) знайдемо зворотний струм насичення I_0 , при якому $U_{ХХ}=0,6$ В:

$$I_0 = \frac{0.275}{\left(\frac{0.6}{e^{0.025}} - 1 \right)} = 1.0382 \cdot 10^{-11} \text{ А}. \quad (7)$$

По формулі (6) знайдемо струм короткого замикання ФЕ при $W=500$ Вт/м²:

$$I_{K3500} = \frac{500}{1000} \cdot 0.275 = 0.1375 \text{ А}. \quad (8)$$

З формули (5) знайдемо значення фото-ЕРС для потужності сонячного випромінювання 500 Вт/м²:

$$U_\Phi = 0.025 \cdot \ln \left(\frac{0.1375}{2 \cdot 1.0382 \cdot 10^{-11}} + 1 \right) = 0.565 \text{ В}. \quad (9)$$

По наведених вище формулах побудуємо ВАХ фотоелементу при різних значеннях потужності сонячного випромінювання, рис. 3.

Як видно з рис. 3, струм, який генерується фотоелементом, буде постійним від режиму короткого замикання до напруги 0,45 В.

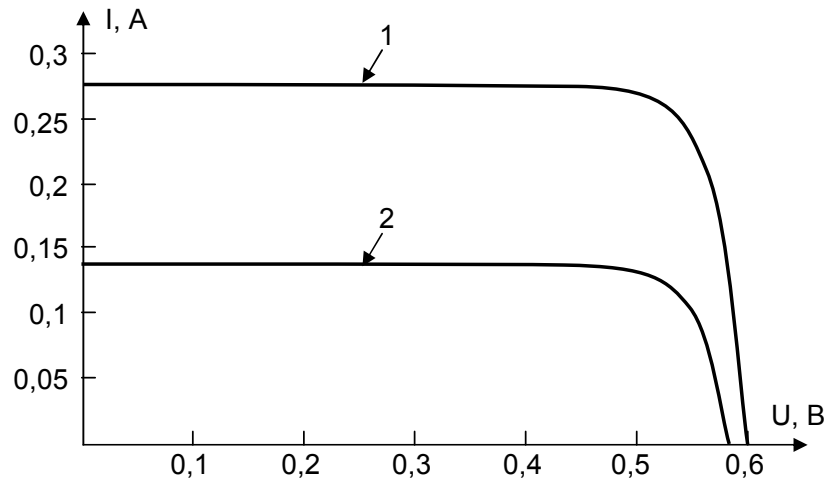


Рис. 3. Теоретична ВАХ фотоелементу при різних значеннях потужності сонячного випромінювання та $T=25^{\circ}\text{C}$, 1 – $W=1000 \text{ Вт/м}^2$, 2 – $W=500 \text{ Вт/м}^2$

Моделювання ФЕ у Matlab.

Широке розповсюдження фотоелементів в останні роки призвело до того, що розробники програмного забезпечення почали додавати їх математичні моделі до систем моделювання. Починаючи з версії 7 спрощена модель сонячної батареї з'явилась і в системі Matlab, на рис. 4 показана схема для зняття її ВАХ.

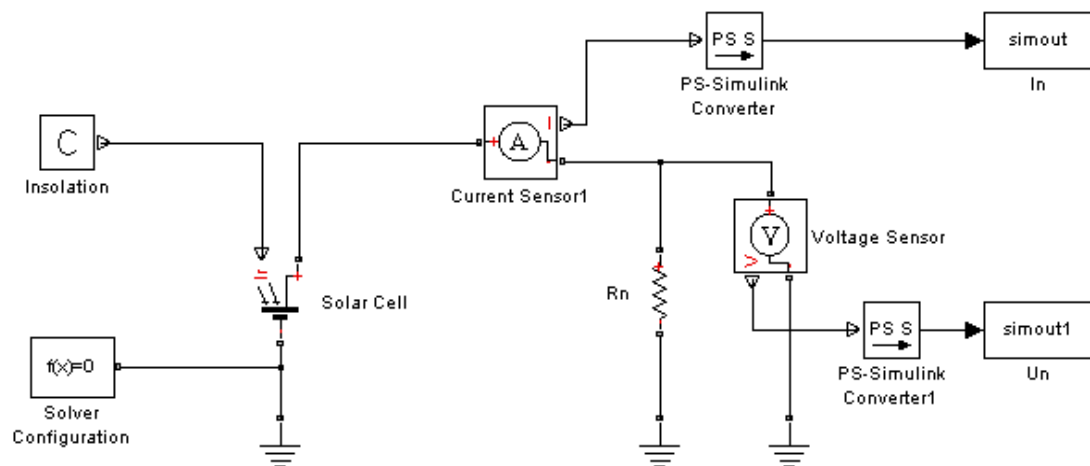


Рис. 4. Схема для зняття ВАХ з моделлю ФЕ із бібліотеки Simulink: Insolation – блок встановлення величини потужності сонячного випромінювання, Solar Cell – сонячна батарея, Rn – опір навантаження

Задамо наступні параметри ФЕ: зворотний струм насичення $I_0=1.9 \cdot 10^{-11} \text{ А}$; температура р-п переходу $T=25^{\circ}\text{C}$; струм короткого замикання $I_{K3}=0.275 \text{ А}$; потужність сонячного випромінювання $W=1000 \text{ Вт/м}^2$; кількість фотоелементів $N=1$; послідовний опір фотоелементу $R_S=0.01 \text{ Ом}$, які відповідають основним параметрам для одного фотоелементу сонячної батареї УН116*116-12А/В250 [8].

Результати моделювання ВАХ фотоелементу СБ при різних значеннях потужності сонячного випромінювання показані на рис. 5. Як видно з рис. 5, струм короткого замикання прямо пропорційний потужності сонячного випромінювання W , в той час як напруга холостого ходу логарифмічно залежить від W , асимптотично наближаючись до

0,6 В. Отже, ВАХ ФЕ побудована на основі теоретичних результатів, збігається з про-
 модельованою в Matlab.

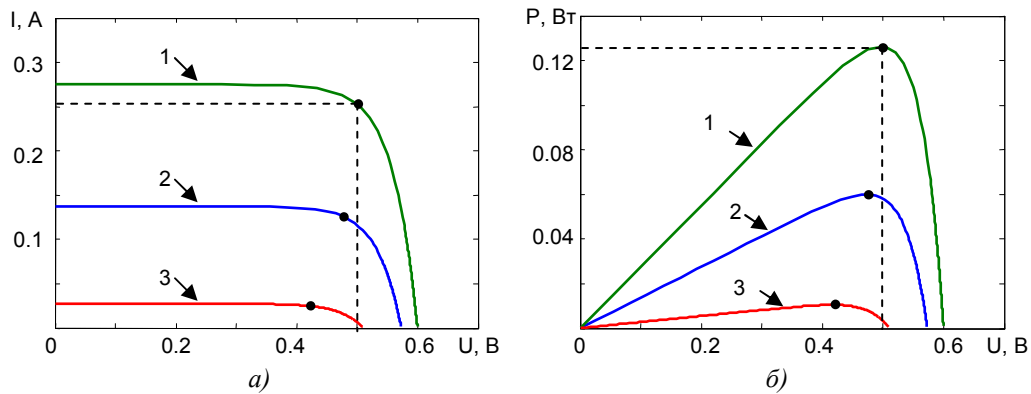


Рис. 5. ВАХ (а) та залежність P-U (б) моделі ФЕ з бібліотеки Simulink при $T=25^{\circ}\text{C}$, 1 – $W=1000 \text{ Вт/м}^2$, 2 – $W=500 \text{ Вт/м}^2$, 3 – $W=100 \text{ Вт/м}^2$

Суттєвим недоліком вбудованої моделі Simulink є те, що вона не враховує вплив температури на параметри, що ускладнює створення системи стабілізації точки максимальної потужності. Використовуючи рівняння (2), в пакеті Matlab (Simulink) була створена вдосконалена температурно-залежна модель двох послідовно з'єднаних сонячних батарей, які складаються з 12 послідовно включених діодів. Кожна з СБ має наступні параметри: $P_{\text{МТМ}} = 1.5 \text{ Вт}$, $I_{\text{КЗ}} = 0.275 \text{ А}$, $U_{\text{ХХ}} = 7.2 \text{ В}$. Для врахування залежності напруги холостого ходу та струму короткого замикання від температури введені наступні коефіцієнти: $T_{\text{КЗ}} = 0.065 \pm 0.015 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ХХ}} = -27 \pm 3 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$.

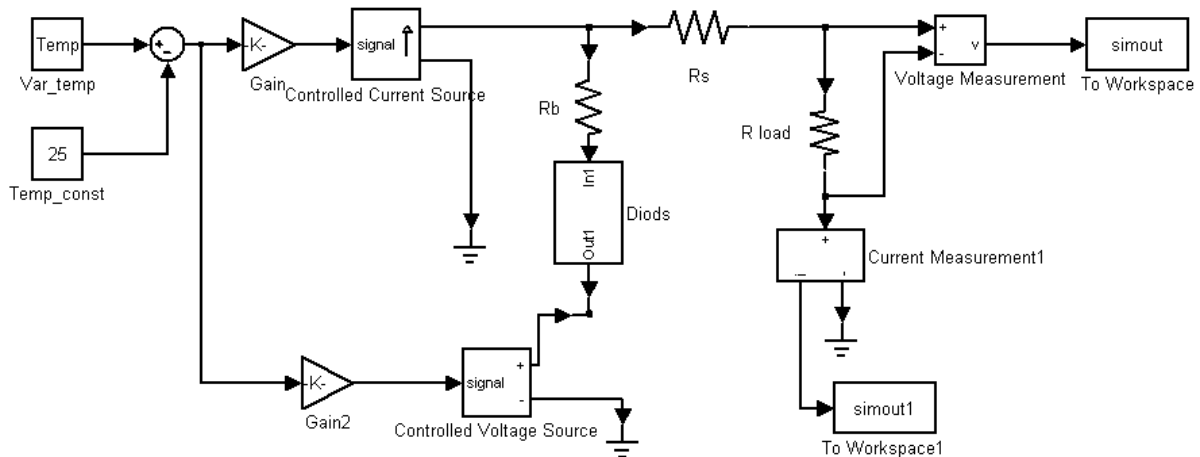


Рис. 6. Модель сонячної батареї: R_s – послідовний опір СБ, R_b – опір бази діодів, R_{load} – опір навантаження

Використовуючи модель (рис. 6), були побудовані залежності $I=f(U)$ та $P=f(U)$ (рис. 7) при зміні поверхневої густини потужності сонячного випромінювання (W , Вт/м^2) та температури (T , $^{\circ}\text{C}$).

Як видно з побудованих залежностей, збільшення температури суттєво зменшує максимальну потужність, що віддає СБ (при $T=25^{\circ}\text{C}$ $W=3,25 \text{ Вт}$, при $T=65^{\circ}\text{C}$ $W=2,65 \text{ Вт}$). Отримані результати були порівняні з експериментальними даними для двох послідовно включених СБ $\text{YN116} \times 116\text{-12A/B250}$ (рис. 8, травень 2010 року, $T=23^{\circ}\text{C}$, $W \approx 1000 \text{ Вт/м}^2$).

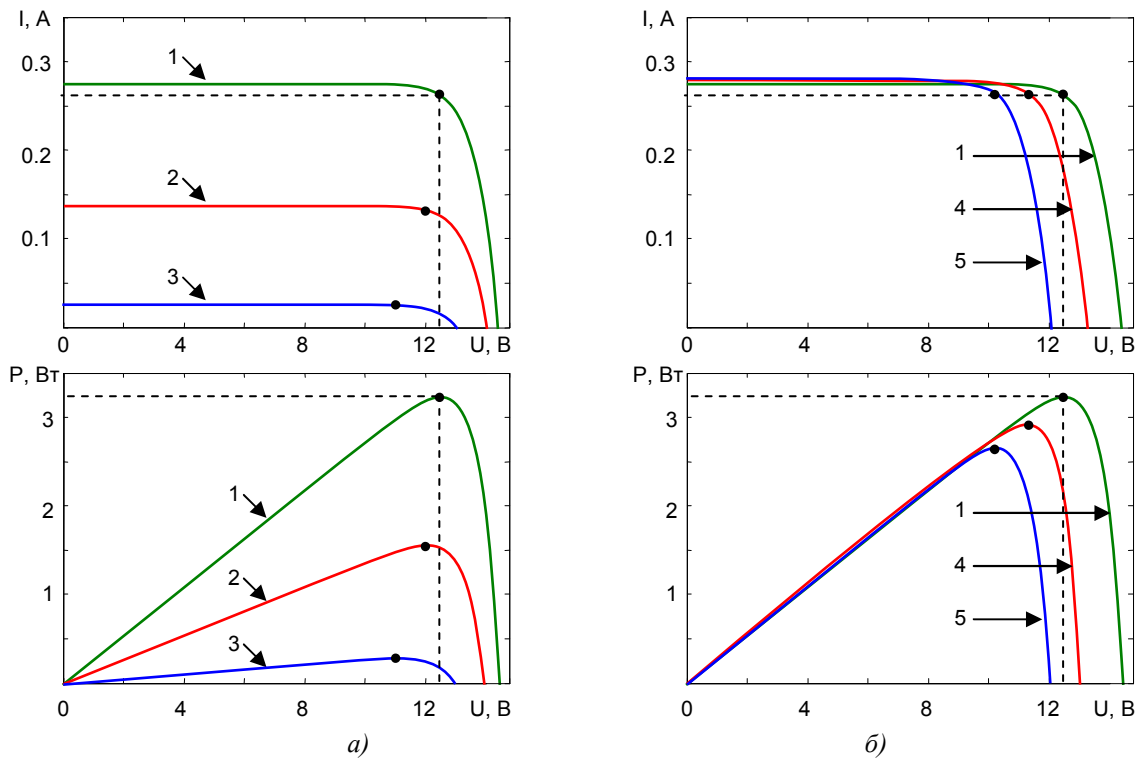


Рис. 7. ВАХ та характеристика P-U вдосконаленої моделі СБ при зміні потужності сонячного випромінювання (а) та температури (б), 1 – $W=1000 \text{ Вт/м}^2$ при $T=25^\circ\text{C}$, 2 – $W=500 \text{ Вт/м}^2$ при $T=25^\circ\text{C}$, 3 – $W=100 \text{ Вт/м}^2$ при $T=25^\circ\text{C}$, 4 – $W=1000 \text{ Вт/м}^2$ при $T=45^\circ\text{C}$, 3 – $W=1000 \text{ Вт/м}^2$ при $T=65^\circ\text{C}$

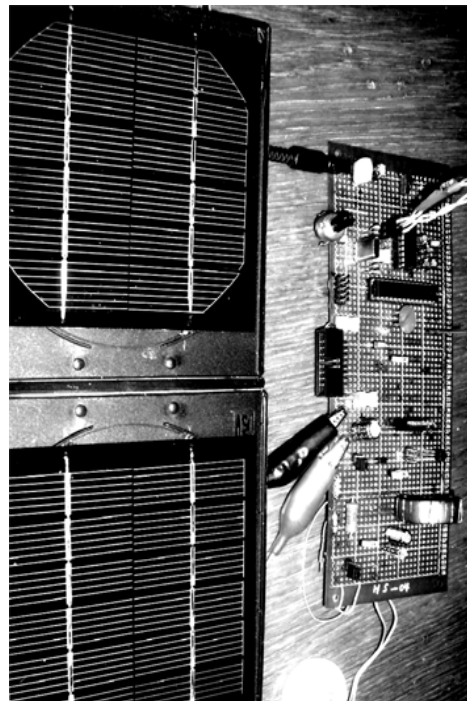
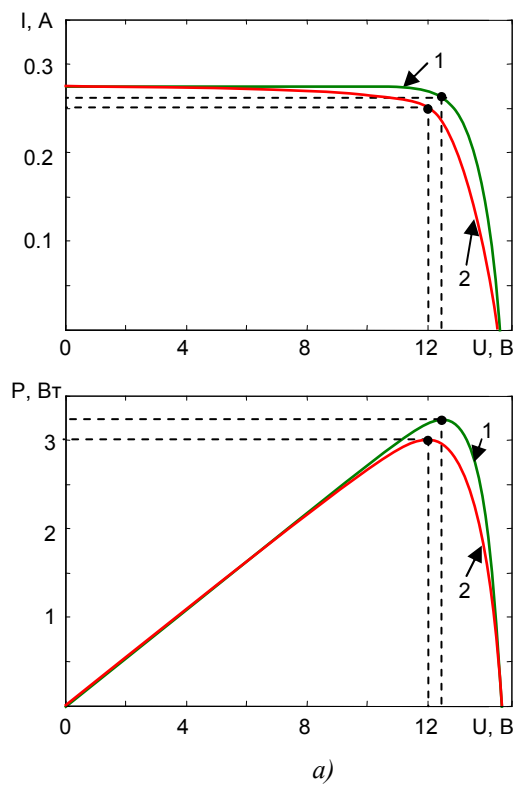


Рис. 8. Порівняння результатів моделювання (1) та експериментальних даних (2) при $W=1000 \text{ Вт/м}^2$ та $T=25^\circ\text{C}$ (а); фото двох СБ УН116*116-12А/В250 з системою стабілізації точки максимальної потужності (б)

Суттєвою складністю при побудові експериментальних ВАХ виявилось наступне:

- вимірювання потужності сонячного випромінювання та проведення експерименту при фіксованому $W \approx 1000 \text{ Вт/м}^2$ (вимірювалась фотодатчиком APDS-9002 [9]),
- зняття характеристик при певних фіксованих параметрах температури T (температура панелі вимірювалась напівпровідниковим датчиком DS18B20 [10]).

Як видно з порівняння характеристик, в цілому результати моделювання збігаються з експериментально отриманими даними. Відмінністю є те, що «коліно» експериментальної кривої більш полого, і в результаті точка максимальної потужності зміщується в бік менших напруг зі зменшенням її абсолютної величини (максимальна потужність за результатами моделювання $P_{\text{MAX}}=3,25 \text{ Вт}$, експериментальне значення – $P_{\text{MAX}}=3 \text{ Вт}$).

Висновки і пропозиції.

- проведено моделювання сонячної батареї YH116*116-12A/B250 в пакеті Matlab, отримані ВАХ при різних температурах та рівнях потужності сонячного випромінювання;
- запропоновано покращену Matlab-модель сонячної батареї, яка враховує вплив температури p-n переходу на ВАХ;
- встановлено, що точка максимальної потужності сонячної батареї YH116*116-12A/B250 зміщена в бік менших напруг та має менше абсолютне значення у порівнянні з результатами моделювання в пакеті Matlab.

Список літературних джерел.

1. Roger Messenger. Photovoltaic Systems Engineering / Roger Messenger, Jerry Ventre. – [2nd Edition]. – CRC Press, 2003. – 480 p.
2. Roberto Faranda. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems / Roberto Faranda, Sonia Leva // WSES transaction on power systems. – 2008. Vol. 3, №6. – P. 446-455.
3. Vikrant.A.Chaudhari. Automatic Peak Power tracker for solar PV modules using dSPACER software: Master work / Vikrant.A.Chaudhari. – Bombay, 2005. – 98 p.
4. Chihchiang Hua. Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking / Chihchiang Hua, Jongrong Lin, and Chihming Shen // IEEE transactions on industrial electronics. – 1998. Vol. 45, №1. – p. 99-107.
5. Huan-Liang Tsai. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK / Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Sciences. – 2008. – 6 p.
6. Francisco M. González-Longatt. Model of Photovoltaic Module in Matlab™ / Francisco M. González-Longatt // 2 congreso iberoamericano de estudiantes de ingeniería eléctrica, electrónica y computación, 2005. – 5 p.
7. Васильєва Л.Д. Напівпровідникові прилади: Підручник / Васильєва Л.Д., Медведенко Б.І., Якименко Ю.І. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2003. – 338 с.
8. Солнечные модули из монокристаллического кремния YH116*116-12A/B250-YH116*116-12A/B250-M. [електронний ресурс] – режим доступу до документу: <http://www.kosmodrom.com.ua/pdf/S1195.pdf>
9. Agilent APDS-9002 Miniature Surface-Mount Ambient Light Photo Sensor Data Sheet. [електронний ресурс] – режим доступу до документу: <http://www.avagotech.com/docs/5989-3051EN>
10. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. [електронний ресурс] – режим доступу до документу: <http://pdfserv.maxim-integrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>