

РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ
СИСТЕМ АВІОНІКИ

Вступ

Одним з основних методів перетворення сонячної енергії в електричну є використання напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів. Більшість сучасних модулів сонячних батарей має ефективність менше 20 %, хоча в умовах космічного простору їх ефективність може сягати 80 %. Незважаючи на відносно низьку їх ефективність, в світі спостерігається значний ріст сонячної енергетики.

Для виготовлення наземних фотоелектричних перетворювачів найбільш придатними вважаються напівпровідники Si, GaAs, CdTe. Серед них найбільш розповсюдженим є кремній, що, в основному, обумовлено його низькою вартістю.

Одне з найпростіших конструктивних рішень фотоелектричного перетворювача показано на рис. 1.

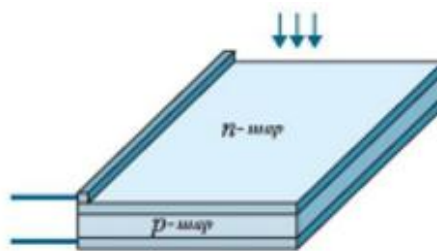


Рис. 1. Спрощена конструкція фотоелектричного перетворювача

Величина електрорушійної сили при освітленні напівпровідникового переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольтамперної характеристики перетворювача:

$$U = \frac{A \cdot k \cdot T}{e} \cdot \ln \frac{I + I_0}{I_0} + I \cdot R_n, \quad (1)$$

де I – загальний струм; I_0 – фотострум; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; q – заряд електрона.

На рис. 2 показано приклад вольтамперної характеристики типового фотоелемента.

На цьому рисунку: $I_{лз}$ – струм короткого замикання, $U_{хх}$ – напруга холостого ходу, P_{max} точка оптимальної потужності, I_{mp} – струм в точці оптимальної потужності, U_{mp} – напруга в точці оптимальної потужності.

Для визначення точки оптимальної потужності, а значить і оптимального режиму роботи фотоелектричного перетворювача, необхідно знати вольтамперну характеристику. А це, зокрема, можливо шляхом моделювання такої характеристики на основі як певних експериментальних даних, так і аналітичних співвідношень з використанням схеми заміщення фотоелектричного перетворювача.

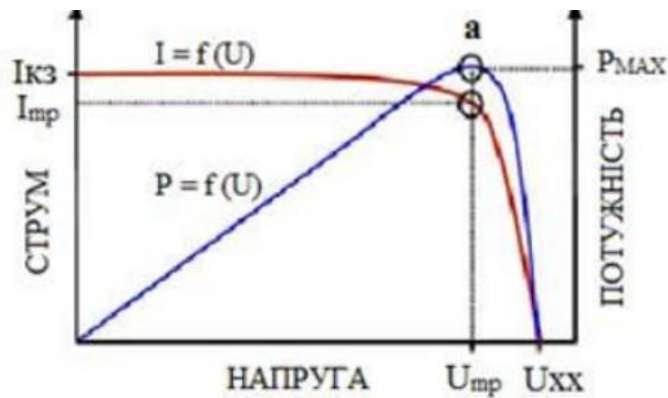


Рис. 2. Вольтамперна характеристика фотоелемента

1. Математичні моделі характеристик та методи визначення параметрів моделей фотоелектричних перетворювачів

У наукових публікаціях [3, 5] в якості основної характеристики фотоелектричних перетворювачів використовується вираз для вольтамперної характеристики, що був отриманий на базі їх схеми заміщення із зосередженими параметрами:

$$I_n = I_\phi - I_0 \cdot \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot U_n + I_n \cdot R_n}{A \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{U_n + I_n \cdot R_n}{R_u} \quad (2)$$

В свою чергу, параметри такої моделі можуть бути представлені функціональними залежностями від основних параметрів, що впливають на роботу перетворювачів, а саме, освітленості E і температури T , які аналітично мають вигляд:

$$\begin{cases} I_n = N_{\text{пит}} \cdot S \cdot E \cdot a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot T ; \\ I_0 = \exp a_3 \cdot T + a_4 ; \\ R_n = a_5 \cdot \exp a_6 \cdot T , \end{cases} \quad (3)$$

де $N_{\text{пит}}$ – питома енерговіддача фотоелектричного перетворювача при освітленості $E = 1360 \text{ Вт} / \text{м}^2$ і температурі $T = 40^\circ \text{C}$; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – емпіричні коефіцієнти; S – площа прийомної поверхні перетворювача.

Параметр A такої моделі, зазвичай, є певною константою, хоча в деяких окремих випадках він може також вважатися залежним від температури. Для інженерної практики модель вольтамперної характеристики доцільно представляти за трьома характерними точками, що можуть бути досить просто знайдені за допомогою нескладних вимірювань. Такими точками є: струм короткого замикання; напруга холостого ходу; струм та напруга в оптимальній точці.

Одною з можливих математичних моделей характеристик перетворювачів може бути модель у вигляді залежності

$$I_n = I_{\text{кз}} \cdot \left[1 - \exp f U_n \right], \quad (4)$$

де

$$f U_n = U_n - U_{\text{хх}} \cdot \frac{\ln 1 - i}{U_{\text{хх}} j - 1} \quad (5)$$

Змінні i та j в цьому виразі визначають відносне положення точки максимальної потужності, а саме:

$$\begin{cases} i = I_{\text{опт}} / I_{\text{кз}} ; \\ j = U_{\text{опт}} / U_{\text{xx}} . \end{cases} \quad (6)$$

Подібною аналітичною моделлю може бути, наприклад, співвідношення

$$I_{\text{н}} = I_{\text{кз}} \cdot \left[1 - \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{xx}}} \cdot \exp \left[\frac{U_{\text{н}} - U_{\text{xx}} \cdot j \cdot \ln 1-i}{U_{\text{опт}} - U_{\text{xx}}} \right] \right] \quad (7)$$

або аналогічна залежність

$$I_{\text{н}} = I_{\text{кз}} \cdot \left[1 - C_1 \cdot \left[\exp \left(\frac{U_{\text{н}}}{C_2 \cdot U_{\text{xx}}} \right) - 1 \right] \right], \quad (8)$$

де

$$\begin{cases} C_1 = 1 - i \cdot \exp \left[\frac{-j}{C_2} \right]; \\ C_2 = \left[\frac{j-1}{\ln 1-i} \right]. \end{cases} \quad (9)$$

Основною проблемою використання моделей (4) – (9) є те, що вони потребують визначення залежностей виду $I_{\text{кз}}$, $I_{\text{онм}}$, U_{xx} , $U_{\text{онм}}$ від освітленості та температури.

Для визначення параметрів моделі, тобто відповідних коефіцієнтів, рекомендується наступна послідовність операцій:

1) визначають коефіцієнти a_1 та a_2 за умови

$$I_{\phi} = \eta \cdot S \cdot E \cdot a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot T \approx I_{\text{кз}} \quad E, T \quad (10)$$

Таке допущення справедливе тому, що в діапазоні температур від 0 до 60 °C і освітленості від 600 до 1500 Вт/м² з достатньою для інженерної практики точністю можна вважати, що струм короткого замикання є еквівалентним фотоструму;

2) визначають коефіцієнт A за результатами вимірювання $I_{\text{кз}}$ та U_{xx} при постійній температурі і змінних значеннях освітленості, використовуючи рівняння

$$\frac{A \cdot k \cdot T}{q} = \frac{dU_{\text{xx}}}{d \ln I_{\phi}} \approx \frac{\Delta U_{\text{xx}}}{\Delta \ln I_{\phi}}, \quad (11)$$

3) проводять оцінку залежності струму насичення, тобто коефіцієнтів a_3 та a_4 у виразі (3), від температури за умови

$$\ln I_0 = \ln I_{\phi} - \frac{U_{\text{xx}} \cdot q}{A \cdot k \cdot T} \quad (12)$$

При визначенні коефіцієнтів A , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , доцільно використовувати метод найменших квадратів та експериментальні залежності струму короткого замикання і напруги холостого ходу від освітленості та температури;

4) оцінюють значення параметра схеми заміщення R_n . Відомо кілька варіантів такого визначення. Наприклад, за умови проходження характеристики перетворювача через оптимальну точку його опір можна визначити з наступного співвідношення:

$$R = \frac{U_{\text{опт}} - \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{\text{кз}} - I_{\text{опт}}}{I_0} + 1 \right)}{I_{\text{опт}}} = \frac{N_{\text{max}}}{I_{\text{опт}}^2} - \frac{U_{\text{xx}}}{\ln I_{\text{опт}} / I_0} \cdot \frac{\ln \left(\frac{I_{\text{кз}} - I_{\text{опт}}}{I_0} + 1 \right)}{I_{\text{опт}}} \quad (13)$$

Для фотоелектричних приладів на основі кристалічного кремнію визначення R_n може базуватися на вимірюванні двох вольтамперних характеристик при однаковій температурі, але різних значеннях освітленості та подальшому розрахунку відношення різниць напруг і струмів в області оптимальної точки:

$$R_n = \frac{U_{E_2, I_2} - U_{\text{опт}}}{I_{\text{кз}} E_1 - I_{\text{кз}} E_2} \quad (14)$$

Слід враховувати, що ця формула є справедливою, якщо виконуються наступні умови: величина E_1 є більшою за E_2 , а, також, якщо струм в точці $U(E_2, I_2)$ експериментальної характеристики перетворювача

$$I_2 = I_{\text{опт}E_1} - I_{\text{кз}E_1} - I_{\text{кз}E_2} \quad (15)$$

Дійсно, якщо при зміні освітленості змінюється тільки фотострум, а інші параметри схеми заміщення залишаються незмінними, то можна зробити певний висновок про залежність напруги на виході перетворювача від значення величини струму з урахуванням послідовного опору.

2. Результати експериментальних досліджень фотоелектричних перетворювачів сонячних батарей

З практичної точки зору представляє певний сенс питання адекватності математичних моделей експериментальним результатам. Для відповідних досліджень були відібрані фотоелектричні перетворювачі розробника НДТІП (науково-дослідний технологічний інститут приладобудування), місто Харків, та ФП наземного застосування дослідного виробництва ПО «Прапор», місто Полтава.

Про основні властивості застосованих моделей можна судити за наведеними на рис. 3 залежностями, які відображають поведінку моделей з усередненими коефіцієнтами для перетворювачів, виготовлених ПО «Прапор».

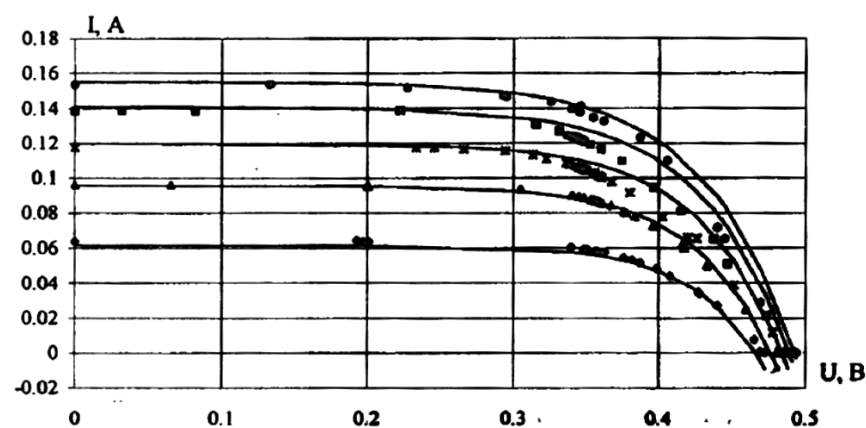


Рис. 3. Експериментальна та розрахункова ВАХ при температурі +60 °С та рівнях освітленості $E=1500 \text{ Вт/м}^2$; $E=1360 \text{ Вт/м}^2$; $E=1160 \text{ Вт/м}^2$; $E=925 \text{ Вт/м}^2$; $E=600 \text{ Вт/м}^2$

Залежність напруги холостого ходу моделей від температури (рис. 4) добре відповідає експериментальним даним в широкому діапазоні температур від -40 °С до +60 °С.

Подальше зменшення величини U_{xx} зі зниженням температури пов'язане з тим, що в моделі відсутня залежність коефіцієнта A від температури, що зі зниженням температури починає різко зростати.

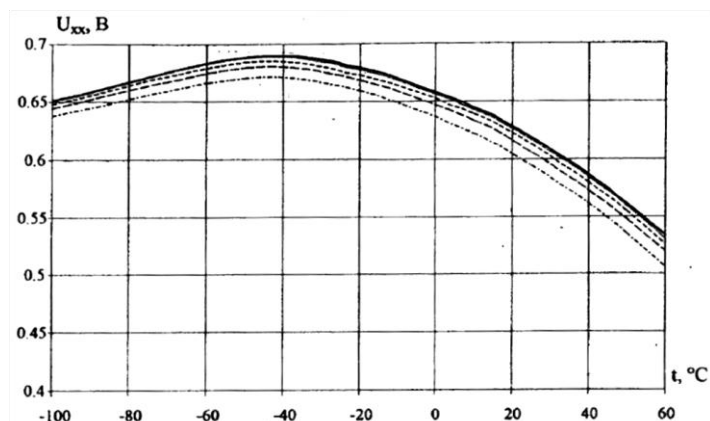


Рис. 4. Залежність напруги холостого ходу перетворювачів від температури

Характер кривих $I_{K3}(T)$ та $R_n(T)$, наведених на рис. 5, 6, дозволяє зробити висновок, що їх залежність від температури з достатньою для практичного застосування точністю відповідає теоретичним даним.

Функціональний зв'язок параметрів i та j від температури не суперечить експериментальним даним аж до -100 °C. Однак їх точність поблизу лівої межі діапазону суттєво зменшується.

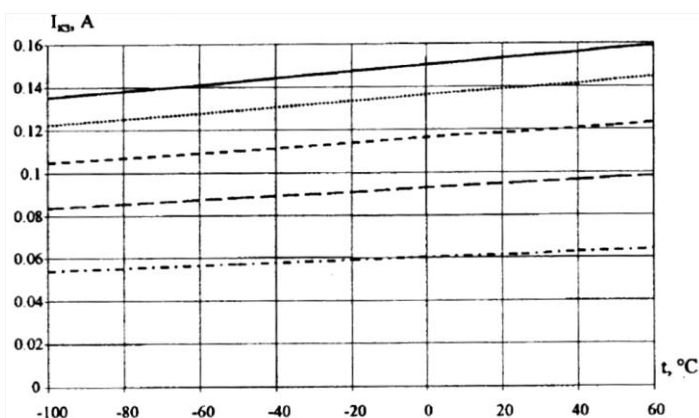


Рис. 5. Залежність I_{K3} від освітленості та температури

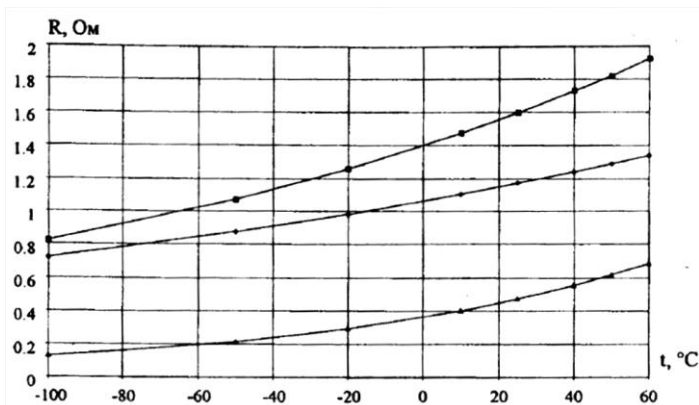


Рис. 6. Залежність величини опору R_n від температури

Висновки

Таким чином, розроблені моделі продемонстрували свою адекватність до температур порядку $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. При необхідності зробити екстраполяцію до більш низьких температур, необхідно вжити спеціальних заходів, з яких найбільш простий в реалізації буде, наприклад, застосування спеціальної лінійної або фрагментарно-лінійної функції, що характеризує залежність коефіцієнта A від температури.

Список літератури:

1. Раушенбах Г. Довідник з проєктування сонячних батарей ; пер. с англ. Москва : Энергоатомвид, 1983. 357 с.
2. Бортові енергосистеми космічних апаратів на базі сонячних та хімічних батарей / Н.В. Белан, К.В. Безручко, В.Б. Єлісеєв та ін. ; у 2 т. Харків, 1992.
3. Тімашев С.В. Фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії : учеб. пособ. / С.В. Тімашев, В.А. Гріліхес. Москва : Энергія, 1985. 300 с.
4. Бордіна Н. М. Моделювання вольт-амперних характеристик сонячних елементів та сонячних батарей / Н. М. Бордіна, В.О. Летін // Електротехнічна промисловість. Сер. Хім. і фіз. джерела струму. 1986. С. 1858–1866.
5. Бузанова Л. К. Напівпровідникові фотоприймачі / Л. К. Бузанова, А. Я. Гліberman. Москва : Энергія, 1976. 486 с.
6. Glynn, Larry W., McDermoff, Josef K., Oss John P. Saber digital computer simulation of an electrical power subsystem // Proc. 23rd intersoc. Energy Conv. Eng. Conf. August 1988. Vol. 3. P. 543–546.
7. Васильєв В.В. Переходні процеси в ланцюгах із фотоперетворювачами / В. В. Васильєв, В. Р. Заявлін, В. О. Летін, Ю. П. Хотунцев. Геліотехніка. 1987. 586 с.
8. Slonim M.A., Tslaf A.L. Experimental investigation of transient phenomena in solar sell panels // Proc. 16th Convention of IEEE in Israel, Tel-Aviv. 1989. P. 1–3.
9. Некрасов М.М. Випробовування елементів радіоелектронної апаратури / М. М. Некрасов, В. В. Платонов, Л. І. Даденко. К. : Вища шк., 1981. 304 с.
10. Oesen D.R., Derg H.M. Properties Die Bond alloys relating to thermal fatigue // IEEE Transact on component, hybrids and manufacturing technology. 1979/
11. Miller P.J. Engineering to counter the EMT theat // Radio and Electron. Eng. 1983. Vol. 53. №11–12. P. 387–392.
12. Gates M.J., Goldhammer L.J. Solar current degradation factors // Proc. 16th Intersoc. Energy conversion Engineering Conf. Technologies for the Transition Atlanta, Ga. 1981. N. Y. 1981.

Надійшла до редколегії 05.03.2025

Відомості про авторів:

Меняйло Олександр Дмитрович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри проєктування та експлуатації електронних апаратів, Україна; e-mail: oleksandr.meniailo@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3760-0523>

Григор'єва Ольга Володимирівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри проєктування та експлуатації електронних апаратів, Україна; e-mail: olha.hryhorieva@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5759-8897>

Махонін Віктор Геннадійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри проєктування та експлуатації електронних апаратів Україна; e-mail: viktor.makhonin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5608-0513>