

8. Романов В. Н. Системный анализ для инженеров – СПб: СЗГЗТУ – 2002. – 186 с.
9. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки – М. Энергоатомиздат, 1991 – 208 с.
10. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента – 290 с.
11. Вольт-амперные характеристики фотопреобразователей [Электронный ресурс]: Официальный сайт "Hebes corporation". – Режим доступа: <http://www.hebesolar.com>.
12. Спецификация на фотопреобразователи из монокристаллического кремния, размером 156x156 мм [Электронный ресурс]: ПАО "Квазар", производитель БФ. – Режим доступа: <http://www.kvazar.com>;
13. Характеристики энергогенерирующего оборудования [Электронный ресурс]: Официальный сайт фирмы "Аванте". – Режим доступа: <http://www.avante.com.ua>;
14. Данные по температуре окружающей среды, интенсивности солнечного излучения, средней скорости ветрового потока [Электронный ресурс]: Архив метеоданных. – Режим доступа: <http://www.meteorprog.ua>;
15. Черных И.В. "Simulink: Инструмент моделирования динамических систем" [Электронный ресурс]: Информационный центр MathWorks. – Режим доступа: <http://www.matlab.exponenta.ru/simulink/book>;

УДК 621.383.51

А.В.Гамарко (Институт відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Методи чисельної апроксимації вольт-амперних кривих фотоелектричного модуля

В даній роботі розглядаються існуючі математичні моделі фотоелектричних модулів(ФМ) та пропонується використовувати лінійну апроксимацію для створення математичної моделі ФМ.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, математичні моделі, вольт-амперні характеристики, інтерполяція, чисельна апроксимація, похибка, кубічний сплайн, система лінійних алгебраїчних рівнянь, моделювання на комп'ютері.

В данной работе рассматриваются существующие математические модели фотоэлектрических модулей (ФМ) и предлагается использовать линейную аппроксимацию для создания математической модели ФМ.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, математические модели, вольт-амперные характеристики, интерполяция, численная аппроксимация, погрешность, кубический сплайн, система линейных алгебраических уравнений, моделирование на компьютере.

Вступ. На даний час однією з ключових проблем моделювання режимів функціонування фотоелектричних модулів в системі з навантаженням є адекватна експериментальним даним розробка математичних моделей вольт-амперних характеристик ФМ, придатних для реалізації розрахункових процесів на ЕОМ.

Постановка задачі. Розглянемо основне рівняння вольт-амперних характеристик сонячного елемента з урахуванням параметрів A, R_S, R_{SH} :

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(U + IR_S)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U}{R_{SH}}, \quad (1)$$

де A – коефіцієнт, отриманий при порівнянні теоретичної та експериментальної вольт-амперної характеристики, який набуває значення від 1 до 5; R_S – послідовний опір сонячного елемента; R_{SH} – шунтовий опір сонячного елемента; I – струм навантаження або вихідний струм сонячного елемента; I_L – фотострум, що протікає через р-п перехід фотоперетворювача; I_0 – струм діоду; U – падіння напруги на навантаженні; T – термодинамічна температура; k – стала Больцмана; e – модуль заряду електрона.

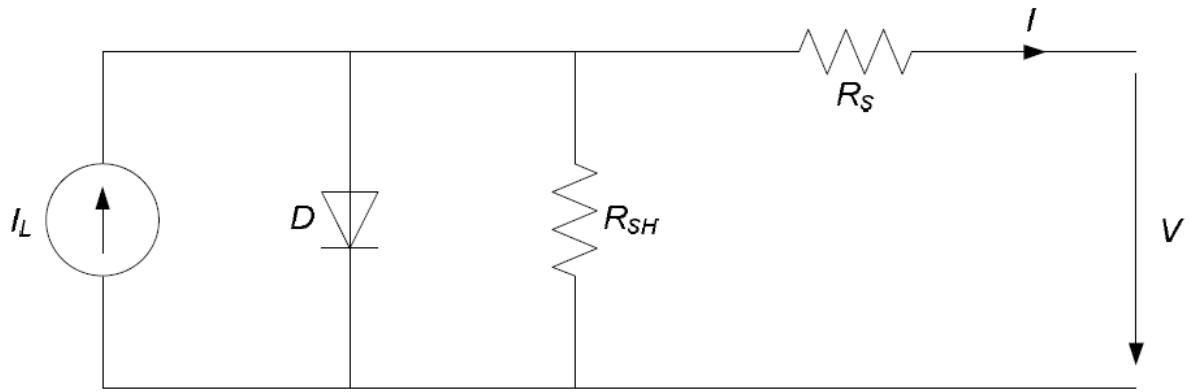


Рис. 1. Схема заміщення фотоелектричного елемента.

Розглянута модель сонячного елемента (рис. 1) широко використовується при аналізі сонячних елементів і фотобатарей, однак характеристики, отримані на підставі цієї моделі, мають незначні, але часом небажані відхилення від характеристик реального сонячного елемента [1]. Ще одним із недоліків цієї моделі є те, що параметри, які входять у це рівняння, рідко надаються виробником фотомодулів. Через це постає практична задача

створення математичної моделі, яка б базувалася на основі даних технічної документації на ФМ, таких як номінальна потужність, струм короткого замикання, напруга холостого ходу, максимальний робочий струм, максимальне навантаження, температурний коефіцієнт, вольт-амперна характеристика.

Розглянемо типові вольт-амперні характеристики ФМ (див. рис. 2).

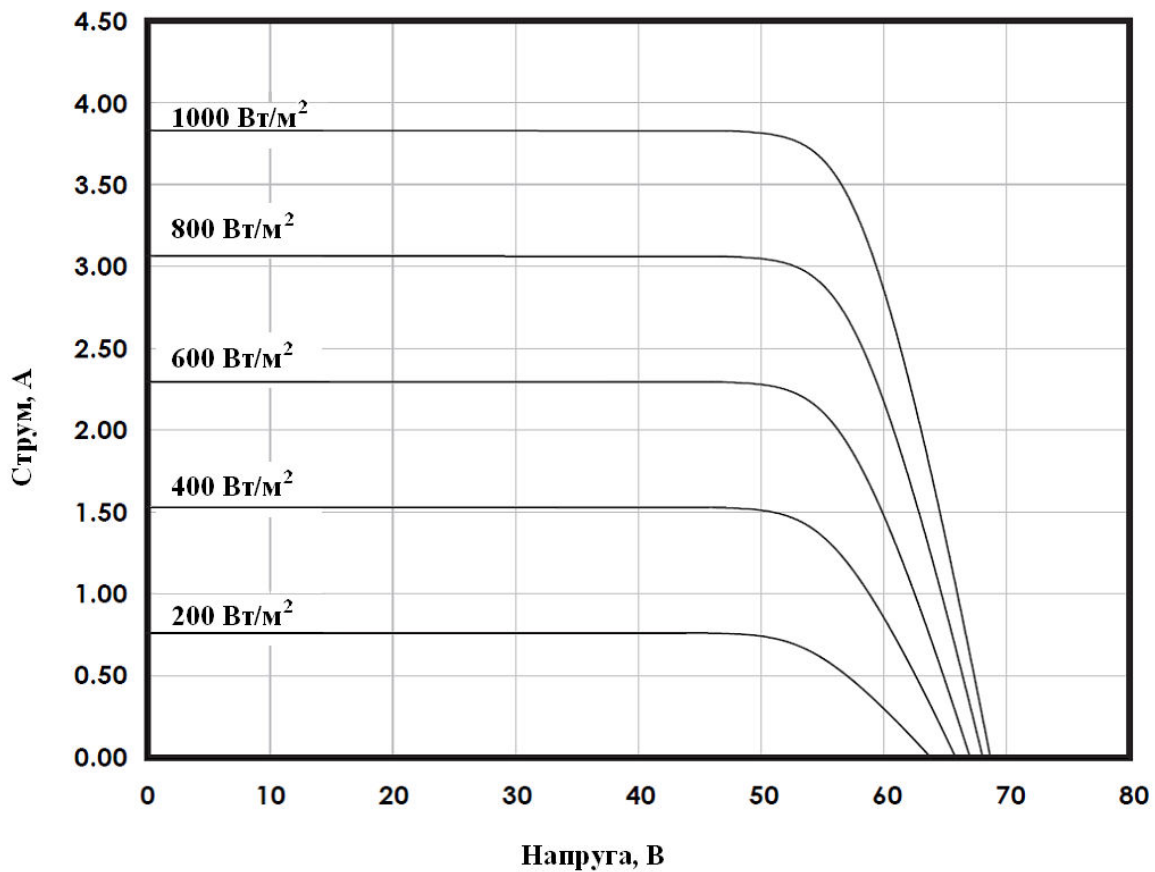


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика ФМ HIT Power 200.

Як видно з рис. 2, побудовані криві є подібними. Тому зрозуміло, що крива, наприклад, для 900 Вт/м², матиме подібний вигляд до кривої для 1000 Вт/м². Проте для різних фотомодулів ці криві матимуть різні значення при одній і тій же радіації.

Використовуючи вольт-амперну характеристику ФМ *HIT Power 200S* (рис. 2), розглянемо два методи апроксимації та порівняємо їх точність.

Візьмемо з кривої для 1000 Вт/м² (рис. 2) 15 точок та запишемо їх до таблиці 1.

Таблиця 1. Експериментальні значення струму і напруги для 1000 Вт/м²

№п/п	Струм, А	Напруга, В
1	3,83	0
2	3,82	48,59
3	3,8	51
4	3,76	53
5	3,67	55
6	3,56	56
7	3,44	57
8	3,09	59
9	2,85	60
10	2,25	62,18
11	1,75	63,85
12	1,25	65,38
13	0,75	66,74
14	0,25	68,08
15	0	68,7

Метод кусково-лінійної інтерполяції. Згідно з даним методом з'єднаємо сусідні точки прямолінійними відрізками та одержимо ламану лінію, яка й апроксимує нашу криву. Для кожного відрізка будується власна функція $g_k(x)$. Функції $g_k(x)$ для кожного з n відрізків $[x_k, x_{k+1}]$ становлять поліноми першого степеня і можуть бути одержані з рівняння прямої, яка проходить через (x_k, y_k) та (x_{k+1}, y_{k+1}) [2]:

$$g_k = a_0 + a_1x, a_1 = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k};$$

$$a_0 = y_k - a_1x_k.$$

(2)

Тоді, використавши мову програмування *Matlab*, запишемо програму лінійної апроксимації до таблиці 2 та виконаємо розрахунки для даних, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів прямої для заданих інтервалів

$[x_i; x_{i+1}]$	a_0	a_1
[0; 48,59]	-0,00021	3,83
[48,59; 51]	-0,0083	4,223237
[51; 53]	-0,02	4,82
[53; 55]	-0,045	6,145
[55; 56]	-0,11	9,72
[56; 57]	-0,12	10,28
[57; 59]	-0,175	13,415
[59; 60]	-0,24	17,25
[60; 62,18]	-0,27523	19,36376
[62,18; 63,85]	-0,2994	20,86677
[63,85; 65,38]	-0,3268	22,61601
[65,38; 66,78]	-0,35714	24,6
[66,78; 68,08]	-0,38462	26,43462
[68,08; 68,7]	-0,40323	27,70161

Візьмемо з кривої для 1000 Вт/м² (рис. 2) 13 точок та розрахуємо похибку апроксимації (табл. 3).

Таблиця 3. Похибки апроксимації

напруга, В	струм, А	струм*, А	похибка, %
47,69	3,83	3,820185	0,26
50	3,81	3,808299	0,04
52	3,79	3,78	0,26
54	3,72	3,715	0,13
55,8	3,59	3,582	0,22
56,5	3,5	3,5	0
58	3,29	3,265	0,76
59,36	3	3,0036	0,12
61,41	2,5	2,461927	1,52
63,07	2	1,983533	0,82
64,62	1,5	1,498366	0,11
66,03	1	1,11029	5,79
67,43	0,5	0,492537	0,001

струм* – змодельований струм

Отже, як видно з таблиці 3, максимальна похибка становить 5,2% і виникає вона в частині різкого падіння струму. Відомо, що робоча точка модуля знаходиться на перегині графіка і рідко зміщується до правої частини. Тому отримана функція з достатньою точністю моделює роботу ФМ. Проте є недолік, оскільки ця модель не працює для похідної.

Метод кубічних сплайнів. У деяких випадках необхідно, щоб апроксимуюча функція ФМ була принаймні двічі неперервно диференційованою. Тоді, для того щоб ці умови виконувались, розглянемо кусково-кубічний поліном, який має такі властивості: двічі неперервно диференційо-

ваний; на кожному частковому відрізьку з кубічним поліномом, який має такий вигляд:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3, \quad (3)$$

$$x \in [x_i, x_{i+1}]; \quad i = 1, 2, \dots, n-1.$$

Похідні сплайна:

$$S_i'(x) = b_i + 2c_i(x - x_i) + 3d_i(x - x_i)^2, \quad (4)$$

$$S_i''(x) = 2c_i + 6d_i(x - x_i).$$

Для знаходження коефіцієнтів a_i, b_i, c_i, d_i запишемо умови диференціювання та інтерполяції:

$$S_i'(x_{i+1}) = S_{i+1}'(x_{i+1}),$$

$$S_i''(x_{i+1}) = S_{i+1}''(x_{i+1}), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-2.$$

$$S_i(x) = y_i,$$

$$S_i(x_{i+1}) = y_{i+1}, \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1.$$

Запишемо системи рівнянь, позначивши:

$$h_i = x_{i+1} - x_i; \quad a_i = y_i; \quad i = 1, 2, \dots, n-1: \quad (7)$$

$$c_1 = 0,$$

$$\begin{bmatrix} 2(h_1+h_2) & h_1 \\ h_2 & 2(h_2+h_3) & h_3 \\ & & \vdots \\ & & \vdots \\ h_{n-2} & 2(h_{n-2}+h_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_{n-2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\text{де } \gamma_i = 3 \left[\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \right].$$

Далі знайдемо коефіцієнт d_i :

$$d_i = \frac{2c_{i+1} - 2c_i}{h_i} - \frac{c_{i+1} + c_i}{3h_i}; \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, n-2;$$

$$d_{n-1} = \frac{-c_{n-1}}{3h_{n-1}}.$$

та розрахуємо b_i за формулою:

$$b_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - \frac{c_{i+1} + 2c_i}{3} h_i; \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, n-2;$$

$$b_{n-1} = \frac{y_n - y_{n-1}}{h_{n-1}} - \frac{2}{3} c_{n-1} h_{n-1}.$$

На основі цих формул, використовуючи мову програмування *MATLAB*, розробимо програму, яка б виконала розрахунок кубічної інтерполяції.

Для початку необхідно сформулювати систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Програма, яка буде використовувати рівняння (8), має вигляд:

```
function [c,v,h]=matrix_3(x,y)
k=size(x);
n=k(1)-2;
c=zeros(n,n);
for i=1:1:k(1)-1
    h(i)=x(i+1)-x(i);
end
for i=1:1:n
    y(i+2)
    s1=(y(i+2)-y(i+1))/h(i+1)
    s2=(y(i+1)-y(i))/h(i)
    v(i,1)=3*(s1-s2)
end
for i=1:1:n
    for j=1:1:n
        if i==j & i~=1 & i~=n
            c(i,j)=2*(h(i)+h(i+1));
            c(i,j+1)=h(i+1);
            c(i,j-1)=h(i);
        elseif i==j & i==1 & i~=n
            c(i,j)=2*(h(i)+h(i+1));
            c(i,j+1)=h(i+1);
        elseif i==j & i~=1 & i==n
            c(i,j)=2*(h(i)+h(i+1));
            c(i,j-1)=h(i);
        end
    end
end
end
```

Далі за допомогою методу Гауса напишемо програму розв'язання СЛАР:

```
function x = gaus(c,v)
c_size = size(c)
for k = 1:1:c_size(2)-1
    R = c(k+1,k)/c(k,k);
    v(k+1) = v(k+1)-v(k)*R
    for i = k+1:1:c_size(1)
        c(k+1,i) = c(k+1,i)-c(k,i)*R;
    end
end
end
```

```
S=0
for k=c_size(2):-1:1
    x(k+1,1)=(v(k)-S)/c(k,k);
    S=0
    if k==1
        S=S
    else
        for j=k:1:c_size(2)
            S=S+c(k-1,j)*x(j,1)
        end
    end
end
end
end
```

```
кусових кубічних сплайнів, має такий вигляд:
function [a,b,c,d]=splin_3(x,y)
n=size(x)
[c_m,v,h]=matrix_3(x,y)
c=gaus(c_m,v)
for i=1:n-1
    d(i,1)=-c(i)/(3*h(i))
    b(i,1)=(y(i+1)-y(i))/h(i)-(2/3)*(c(i)*h(i))
    a(i,1)=y(i)
end
end
```

Тоді підставимо значення x_i, y_i з таблиці 1 та запишемо коефіцієнти a_i, b_i, c_i, d_i до таблиці 4.

На основі цих двох програм остаточна математична модель, яка б виконувала побудову

Таблиця 4. Коефіцієнти кубічного сплайну

$[x_i; x_{i+1}]$	a_i	b_i	c_i	d_i
[0; 48,59]	3,83	-0,00021	0	0
[48,59; 51]	3,82	-0,00792	-0,00024	3,29E-05
[51; 53]	3,8	-0,01475	-0,00394	0,000657
[53; 55]	3,76	-0,03314	-0,0089	0,001483
[55; 56]	3,67	-0,0884	-0,0324	0,010799
[56; 57]	3,56	-0,12042	0,000628	-0,00021
[57; 59]	3,44	-0,13651	-0,02886	0,004811
[59; 60]	3,09	-0,22274	-0,02589	0,008629
[60; 62,18]	2,85	-0,25644	-0,01293	0,001977
[62,18; 63,85]	2,25	-0,29228	-0,0064	0,001277
[63,85; 65,38]	1,75	-0,31464	-0,01192	0,002598
[65,38; 66,78]	1,25	-0,34472	-0,01331	0,003169
[66,78; 68,08]	0,75	-0,37365	-0,01265	0,003244
[68,08; 68,7]	0,25	-0,39858	-0,01124	0,006042

Візьмемо з кривої для 1000 Вт/м² (рис. 2) 13 точок та розрахуємо похибку апроксимації (табл. 5).

Таблиця 5. Похибки апроксимації кубічного сплайну

$[x_i; x_{i+1}]$	$x, \text{В}$	$y, \text{А}$	$y_i, \text{А}$	$\delta, \%$
[0; 48,59]	47,69	3,83	3,820187	0,256207
[48,59; 51]	50	3,81	3,808541	0,038295
[51; 53]	52	3,79	3,782177	0,206423
[53; 55]	54	3,72	3,719913	0,002334
[55; 56]	55,8	3,59	3,585268	0,131816
[56; 57]	56,5	3,5	3,501121	0,032029
[57; 59]	58	3,29	3,281229	0,266591
[59; 60]	59,36	3	3,009239	0,307966
[60; 62,18]	61,41	2,5	2,47107	1,157206
[62,18; 63,85]	63,07	2	1,98871	0,564482
[63,85; 65,38]	64,62	1,5	1,50513	0,34201
[65,38; 66,78]	66,03	1	1,024758	2,475774
[66,78; 68,08]	67,43	0,5	0,506532	1,306377

Висновки. 1. Вперше було проведено аналіз використання методів лінійної апроксимації та кубічних сплайнів.

2. Якщо порівняти значення табл. 3 і табл. 5, то стає очевидно, що метод кубічних сплайнів удвічі точніше апроксимує задану функцію.

3. Як видно з результатів у табл. 5, точність падає ближче до точки напруги холостого ходу. Проте це несуттєво, тому що ФМ, як правило, працює в околицях перегину вольт-амперної кривої, де ми маємо високу точність.

4. При збільшенні кількості значень вольт-амперної кривої збільшується точність апроксимації. Проте при використанні методу кубічних сплайнів значно зростає час обробки даних комп'ютером. Це виникає тому, що збільшується кількість рівнянь у СЛАР.

1. Бєкіров Е.А. Автономні джерела електроживлення на базі сонячних батарей. – Сімферополь: ВД "АРИАЛ". – 2011. – 483 с.

2. Лук'янов С.О. Числові методи в інформатиці. – Київ: НТУУ "КПІ", 2007. – 137 с.

УДК 621.316

Д.В.Бондаренко, канд.техн.наук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Інтелектуальні цифрові фотоелектричні системи

В роботі викладено ідею та реалізацію інтелектуальних фотоелектричних систем. Показані можливі режими роботи та описані різні варіанти побудови таких систем. Викладено принцип та підхід до побудови універсальної інтелектуальної системи, яка базується на мікроконтролерах, що збирають та обробляють інформацію і віддають команди. Підібрана узагальнена елементна база для побудови такої системи та окреслений можливий комунікаційний протокол.

Ключові слова: інтелектуальні цифрові фотоелектричні системи, режими роботи фотоелектричних систем, мікроконтролер у фотоенергетиці.

В работе изложена идея и реализация интеллектуальных фотоэлектрических систем. Показаны возможные режимы работы и описаны разные варианты построения таких систем. Изложен принцип и подход к построению универсальной интеллектуальной системы, которая базируется на микроконтроллерах, которые собирают и обрабатывают информацию и отдают команды. Подобрана обобщенная элементная база для построения такой системы и очерчен возможный коммуникационный протокол.

Ключевые слова: интеллектуальные цифровые фотоэлектрические системы, режимы работы фотоэлектрических систем, микроконтроллер в фотоэнергетике.

Вступ. Розвиток відновлюваних джерел енергії, їх застосування в побуті та на виробництві спонукає до розвитку та вдосконалення систем, елементом живлення яких є такі джерела. Одним із напрямків такого розвитку є побудова систем з інтелектуальним керуванням розподілення електричної енергії від джерела до споживача з накопиченням в акумуляторах.

1. Інтелектуальні контролери заряду. Таким чином, першим рішенням, яке можна прийняти, є рух у напрямку побудови інтелектуальних контролерів заряду, які на основі внесених у них алгоритмів будуть виконувати розподілення енер-

гії серед навантаження. У процесі роботи такий контролер повинен мати наступну інформацію: струм із фотоелемента (або фотобатареї); робочу напругу на фотоелементі; струм із акумулятора при розряді, струм в акумулятор при заряді; напругу на акумуляторі; струм, який споживає кожен із підключених споживачів; напругу, яка падає на споживачеві. Базуючись на проведених вимірах цих даних, контролер приймає рішення про заряд або розряд акумулятора, про відключення або підключення споживачів. Алгоритм роботи встановлюється заздалегідь: статично або в ході роботи автоматично коректується завдяки