

Сергій Іванець, Олексій Красножон

ПОШУК ОПТИМАЛЬНОЇ СТЕПЕНЕВОЇ АПРОКСИМАЦІЇ ПОВЕРХНІ КЕРУВАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Сергей Иванец, Алексей Красножон

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ СТЕПЕННОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Sergey Ivanets, Oleksii Krasnozhan

THE SEARCH FOR AN OPTIMAL DEGREE APPROXIMATION OF THE SURFACE CONTROL FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKING SYSTEM OF PHOTOVOLTAIC CONVERTER

Зроблено аналіз апроксимуючих функцій для поверхні керування для систем відстеження точки максимальної потужності фотоелектричних перетворювачів. Запропоновано метод побудови таких систем, що ґрунтується на отриманні поверхні керування (шляхом інтерполяції та апроксимації) як функції двох змінних: густини потоку падаючого сонячного випромінювання та робочої температури фотоелектричного перетворювача. Обґрунтовано та проаналізовано вибір показника ступеня для полінома, що апроксимує інтерпольовані експериментальні дані. Здійснено оцінювання похибок для запропонованих поліномів та проведено порівняння апроксимації, яка розглядалась у попередній статті.

Ключові слова: максимальна потужність, поверхня керування, інтерполяція експериментальних даних, апроксимаційний поліном, поправочна функція, відносна похибка, реперна точка, функція двох змінних, фотоелектричний перетворювач.

Рис.: 6. Табл.: 2. Бібл.: 5.

Проведен аналіз апроксимуючих функцій для поверхні управління для систем відстеження точки максимальної потужності фотоелектричних перетворювачів. Предложено метод построения таких систем, который основывается на получении поверхности управления (путём интерполяции и аппроксимации) как функции двух переменных: плотности потока падающего солнечного излучения и рабочей температуры фотоэлектрического преобразователя. Обоснован и проанализирован выбор показателя степени для полинома, аппроксимирующего интерполированные экспериментальные данные. Приведена оценка погрешностей для предложенных полиномов. Проведено сравнение аппроксимации, рассмотренной в предыдущей статье.

Ключевые слова: максимальная мощность, поверхность управления, интерполяция экспериментальных данных, аппроксимационный полином, поправочная функция, относительная погрешность, реперная точка, функция двух переменных, фотоэлектрический преобразователь.

Рис.: 6. Табл.: 2. Библ.: 5.

The analysis functions for approximating the surface of the control systems for maximum power point tracking of photovoltaic. A method of creating such systems, which is based on receipt of a control surface (by interpolation and approximation) as a function of two variables: the flux density of incident solar radiation and the operating temperature of the photovoltaic. Grounded and analyzed for the selection of the exponent of the polynomial interpolation approximating experimental data. The estimation errors for the proposed polynomials. A comparison of the approximation discussed in the article, with the previously proposed.

Key words: maximum power, control surface, interpolation of the experimental data, an approximation polynomial, correction function, the relative error, reference point, a function of two variables, photovoltaic.

Fig.: 6. Tabl.: 2. Bibl.: 5.

Вступ. У статтях [1; 2] було запропоновано підхід до побудови систем відстеження точки максимальної потужності фотоелектричних перетворювачів, який ґрунтується на математичному апараті нечіткої логіки із можливістю налаштування за допомогою штучних нейронних мереж або генетичних алгоритмів. У подальшому, з метою формування вибірки для «навчання» штучної нейронної мережі, було запропоновано отримати поверхню керування як функцію двох змінних – густини потоку падаючого сонячного випромінювання (S) та робочої температури фотоелектричного перетворювача (t).

Зокрема, у статті [2] для апроксимації цієї поверхні було запропоновано використувати гіперболічну функцію. Причому повний збіг апроксимації та експериментальних даних було дотримано лише у двох точках – 300 та 1000 Вт/м². Як показав подальший аналіз отриманих результатів, запропонована універсальна апроксимація дає

занадто велику похибку порівняно з експериментальними даними (так відносна похибка становить більше 20 %).

Із зазначеного вище випливає гостра необхідність пошуку та отримання більш точнішої апроксимації для поверхні керування. Тому, необхідно розглянути інші можливі варіанти таких апроксимацій.

Аналіз наявних апроксимаційних функцій. Як зазначено у статті [2], як апроксимацію було використано гіперболічну функцію виду:

$$Ra_i = \frac{K_i(S)}{S} | t_i, \quad (1)$$

де Ra_i – апроксимація залежності опору навантаження фотоелектричного перетворювача від значення змінної S при постійному значенні температури t_i ;

$K_i(S) | t_i$ – запропонована поправочна функція;

i – номер побудованої кривої, $i = 1, 2, \dots, 12$.

У свою чергу, поправочна функція $K_i(S) | t_i$ була представлена у вигляді:

$$K_i(S) | t_i = k \cdot S + c, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт нахилу прямої;

c – вільний член, що визначає постійну складову.

Отримана в результаті зазначених математичних операцій універсальна апроксимація для поверхні керування не відповідає вимогам точності.

З іншого боку, інтерполяція експериментальних даних (табл. 1, a та 1, b у [2]) вказує на гіперболічний характер залежності опору навантаження фотоелектричного перетворювача від густини потоку падаючого сонячного випромінювання. Саме тому можна зробити припущення, що знаменник апроксимаційної функції не має бути постійною величиною. Отже, можна запропонувати гіперболічну функцію виду:

$$Ra_i = \frac{x_i}{S^{K_i(S)}} | t_i, \quad (3)$$

де $K_i(S) | t_i$ – запропонована поправочна функція;

x_i – деяка постійна величина;

i – номер побудованої кривої.

У такому випадку поправочна функція $K_i(S)$ є поліномом, який можна представити в загальному вигляді:

$$K_i(S) | t_i = \sum_{n=0}^m a_n \cdot S^n, \quad (4)$$

де a_n – коефіцієнт розкладу полінома;

n – порядковий номер члена полінома, $n = 1, 2, \dots, m$;

m – максимальна ступінь полінома, $0 < m < \infty$.

Слід зауважити, що значення ступеня для поправочної функції має обов'язково відповідати вищезазначеним обмеженням, оскільки:

– при $m = 0$ поліном виду (4) буде мати завжди постійне значення (деяке a_0) при будь-яких значеннях густини S ;

– при $m = \infty$ ступінь складності, а також час, витрачений на обчислення значень полінома виду (4), буде спрямований до нескінченості, що може порушити часові обмеження на час пошуку точки максимальної потужності.

Мета статті. Враховуючи все вищезазначене, можна запропонувати такий вид (3) апроксимаційної функції для пошуку аналітичного опису поверхні керування для системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача, який би забезпечував значно меншу величину відносної похибки (на рівні 1–3 %) обчислення оптимального значення опору навантаження фотоелектричного перетворювача.

Отже, метою цієї статті є спроба оцінити величину відносної похибки для запропонованої вище апроксимації поверхні керування, порівняти її з результатами, отриманими в [2], а також провести пошук найбільш оптимального значення m для ступеня полінома знаменника поправочної функції. Як інструментальний набір для виконання поставлених цілей буде використовуватися оболонка Simulink програмного пакета MATLAB, а також математичний пакет Mathcad.

Виклад основного матеріалу. Під час викладення матеріалу статті вихідні дані, а також усі прийняті домовленості та обмеження повністю відповідатимуть аналогічним, розглянутим у [2].

Почнемо дослідження з того, що покладемо значення m рівним 1, тобто представимо поправочну функцію у вигляді:

$$K_i(S) | t_i = a_1 \cdot S + a_0. \quad (5)$$

У такому разі апроксимаційна функція для деякого значення робочої температури фотоелектричного перетворювача буде набувати вигляду:

$$Ra_i = \frac{x_i}{S^{a_1 \cdot S + a_0}} | t_i. \quad (6)$$

Таким чином, поправочну функцію для кожної з дванадцяти експериментальних кривих, будемо апроксимувати за допомогою лінійної функції виду (5). Для обрахування значень коефіцієнтів a_1 і a_0 цієї прямої необхідно обрати 2 точки. Очевидно, що вибір координат цих точок буде істотно впливати на параметри режиму функціонування фотоелектричного перетворювача. Враховуючи, що використання фотоелектричних перетворювачів при значеннях густини потоку сонячного випромінювання менше за 300 Вт/м^2 не є доцільним і може призвести до нестабільної роботи, а значення густини потоку, більші за 1000 Вт/м^2 , можуть траплятись лише в умовах пустелі [3], будемо обчислювати значення коефіцієнтів залежності (5) у точках, де значення густини падаючого потоку сонячного випромінювання становить $S_1 = 400 \text{ Вт/м}^2$ та $S_2 = 800 \text{ Вт/м}^2$.

Значення постійної величини x_i , що є чисельником у залежностях (3), (6), підбирається у точці S_2 . Тобто у цьому випадку значення полінома степені знаменника залежності (6) штучно робиться рівним 1. Підбір необхідного значення x_i виконується вручну, процес підбору закінчується тоді, коли значення апроксимаційної функції повністю збігається (відносна похибка рівна 0) з інтерпольованою кривою залежності $R_i = f(S) | t_i$. Отримане таким способом значення x_i приймається надалі незмінним. Слід зауважити, що величина x_i не є константою і залежить від значення робочої температури фотоелектричного перетворювача. Фактично, це означає, що для отримання універсальної апроксимації поверхні керування слід буде також виконати апроксимацію залежності $x_i(t)$.

Після цього виконується перехід до точки S_1 . Для незмінного за величиною чисельника виконується підбір необхідного значення степеня полінома знаменника. Після перекладу складеного рівняння на мову Mathcad, отримаємо наступний вираз для підбору значення показника y :

$$400^y = \frac{x_i}{R_i(400)}; 400^y - \frac{3128}{8,02} \text{ solve, } y \rightarrow 0,99578502599445519618. \quad (7)$$

Значення x_i , R_i та y , які використовуються у (7), були обчислені для значення робочої температури фотоелектричного перетворювача, рівного -30 °С. Бачимо, що показник степеня є числом, дуже близьким до 1. Забігаючи наперед, можна зазначити, що така тенденція зберігається і при будь-якому іншому допустимому значенні з діапазону робочих температур.

Очевидно, що тепер ми маємо все необхідне аби обчислити значення двох невідомих коефіцієнтів розкладу полінома (5). Одним із простих шляхів вирішення цієї задачі є складання системи рівнянь виду:

$$\begin{cases} a_1 \cdot 400 + a_0 = y; \\ a_1 \cdot 800 + a_0 = 1. \end{cases} \quad (8)$$

Хоча найпростішим методом вирішення системи рівнянь (8) є підстановка, ми будемо використовувати метод Крамера. Вибір саме цього методу був зумовлений необхідністю автоматизації та уніфікації процесу розрахунків, оскільки очевидно, що значення ступеня полінома (5) в точності дорівнює кількості рівнянь системи. Тобто розв'язання методом підстановки системи, що складається, наприклад, з п'яти рівнянь, вже не є швидким та простим. Крім того, розрахунок систем рівнянь методом Крамера є одним із вбудованих інструментів пакета Mathcad. У результаті розв'язання системи була отримана наступна апроксимація (відповідає робочій температурі -30 °С):

$$Ra_1 = \frac{3128}{S^{1,0525 \cdot 10^{-5} \cdot S + 0,99517}} | t_1. \quad (9)$$

Після виконання зазначених вище дій були отримані апроксимації для всіх функцій виду (6). Для більшої наочності нижче на рис. 1 попарно зображено інтерпольовану криву $R_1(S)$ та отриману апроксимацію $Ra_1(S)$ виду (9).

Для перевірки якості отриманих апроксимацій, обраховуватимемо відносну похибку між відповідною інтерполяцією та побудованою апроксимацією за формулою:

$$\varepsilon = \frac{|R_i(S) - Ra_i(S)|}{R_i(S)} \cdot 100 \%. \quad (10)$$

Таке обчислення похибок виконувалося для кожного з 12 значень температури (для більшої наочності на рис. 2 зображено графік відносної похибки між кривими, які містяться на рис. 1). Результати обчислень показали, що в діапазоні доцільного функціонування фотоелектричного перетворювача, відносна похибка апроксимації за модулем не перевищує 1,8 % за будь-яких значень робочої температури, що свідчить про високу точність отримання апроксимації (а у контрольних точках 400 та 800 Вт/м² відносна похибка взагалі нульова).

«Параболічний» вигляд графіка, зображеного на рис. 2, між реперними значеннями густини потоку падаючого сонячного випромінювання пояснюється великою різницею між кроком отримання експериментальних даних і заданим кроком для апроксимування та інтерполювання засобів пакета Mathcad. Отже, треба опиратися на значення похибок лише у реперних точках.

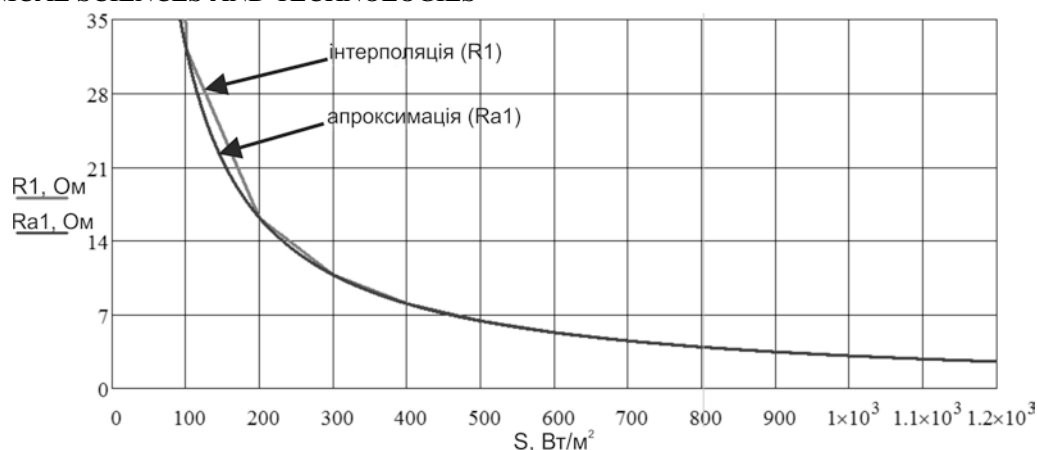


Рис. 1. Інтерполяція та отримана апроксимація залежності виду (10)

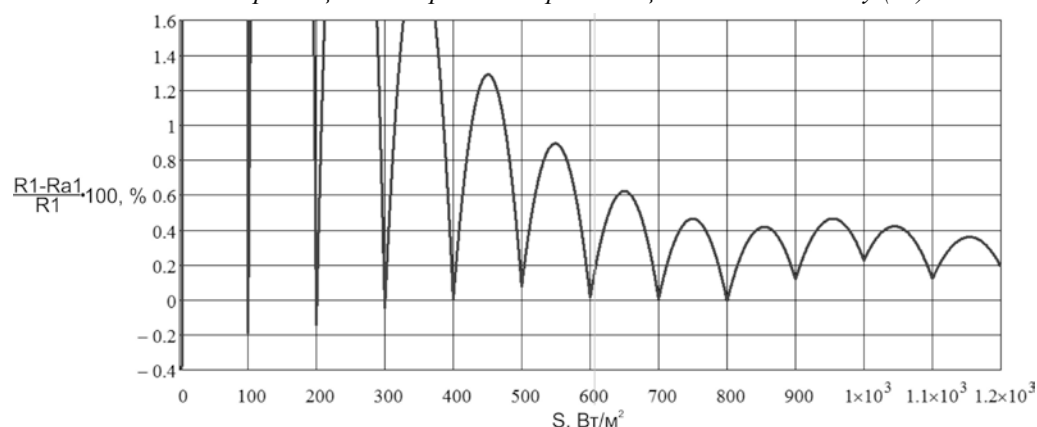


Рис. 2. Відносна похибка між інтерпольованою кривою та апроксимацією залежності виду (10)

Після виконання всіх наведених кроків було отримано апроксимації для дванадцяти залежностей виду (6). Кожна з апроксимуючих функцій має схожі значення коефіцієнтів a_1 , a_0 та x_i , тому проведемо апроксимацію для кожного з цих параметрів окремо. Таким чином, ми отримаємо шукану поверхню керування, оскільки тоді параметр робочої температури перестане бути сталою величиною. Значення отриманих коефіцієнтів поправочних функцій наведено нижче в табл. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти одержаних апроксимуючих функцій виду (6)

Робоча температура, °С	Значення коефіцієнтів апроксимуючих функцій		
	x	a_1	a_0
-30	3128	$1,0525 \cdot 10^{-5}$	0,99157
-20	3212	$1,3050 \cdot 10^{-5}$	0,98956
-10	3292	$1,5425 \cdot 10^{-5}$	0,98766
0	3356	$1,9200 \cdot 10^{-5}$	0,98464
10	3412	$2,3075 \cdot 10^{-5}$	0,98514
20	3456	$2,7575 \cdot 10^{-5}$	0,97795
30	3492	$3,1950 \cdot 10^{-5}$	0,97443
40	3512	$3,7900 \cdot 10^{-5}$	0,96967
50	3516	$4,4325 \cdot 10^{-5}$	0,96455
60	3508	$5,1625 \cdot 10^{-5}$	0,95870
70	3492	$5,8550 \cdot 10^{-5}$	0,95316
80	3456	$6,6600 \cdot 10^{-5}$	0,94673

З аналізу значень, що набувають коефіцієнти, видно, що їх залежність від температури не є лінійною. Тому для апроксимації їх залежностей будемо використовувати нелінійні поліноми (причому невисоких порядків). Для вирішення такої задачі скористас-

мося функцією `polyfit()`, що входить до складу програмного пакета MATLAB [4; 5]. Перевагою її використання є можливість налаштування ступеня полінома апроксимації.

Після виконання експериментів було встановлено, що найбільш оптимально й точно залежність коефіцієнта x від температури можна апроксимувати поліномом виду:

$$xa(t) = -9.1168 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.0538 \cdot t^2 + 6.1233 \cdot t + 3356.9. \quad (11)$$

Для перевірки якості отриманої апроксимації, обрахуємо відносну похибку між відповідною інтерполяцією та побудованою апроксимацією за формулою:

$$\varepsilon = \frac{|x(t) - xa(t)|}{x(t)} \cdot 100 \%. \quad (12)$$

На рис. 3 зображено графік відносної похибки для інтерпольованої та отриманої апроксимованої кривої ($x(t)$ та $xa(t)$ відповідно), з якого видно, що в усьому діапазоні допустимих робочих температур фотоелектричного перетворювача відносна похибка апроксимації за модулем не перевищує 0,09 %.

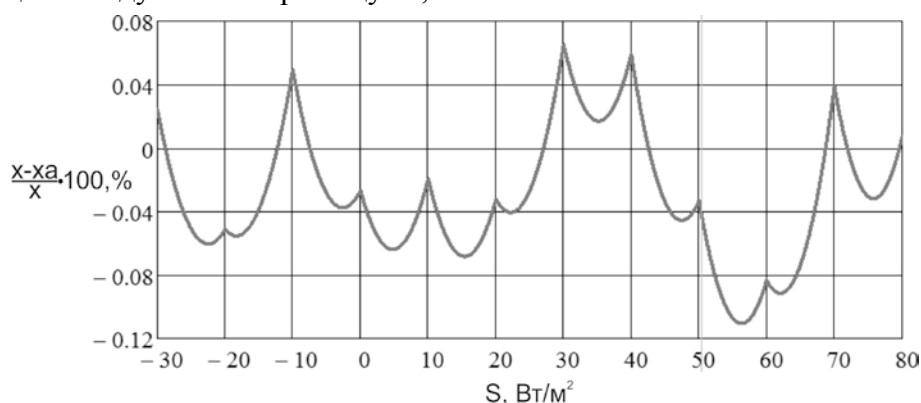


Рис. 3. Відносна похибка між інтерполяцією та апроксимацією залежності $x(t)$

Апроксимаційний поліном для залежності $a_1(t)$ має вигляд:

$$a_1a(t) = 1,7288 \cdot 10^{-12} \cdot t^3 + 2,7858 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 3,6226 \cdot 10^{-7} \cdot t + 1,9018 \cdot 10^{-5}. \quad (13)$$

Для перевірки якості отриманої апроксимації обрахуємо відносну похибку між відповідною інтерполяцією та побудованою апроксимацією за формулою:

$$\varepsilon = \frac{|a_1(t) - a_1a(t)|}{a_1(t)} \cdot 100 \%. \quad (14)$$

На рис. 4 зображено графік відносної похибки для інтерпольованої та отриманої апроксимованої кривої ($a_1(t)$ та $a_1a(t)$ відповідно), з якого видно, що в усьому діапазоні допустимих робочих температур фотоелектричного перетворювача відносна похибка апроксимації за модулем не перевищує 1,6 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_0(t)$ має вигляд:

$$a_0a(t) = -2,5943 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 2,7593 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,9852. \quad (15)$$

Для перевірки якості отриманої апроксимації обрахуємо відносну похибку між відповідною інтерполяцією та побудованою апроксимацією за формулою:

$$\varepsilon = \frac{|a_0(t) - a_0a(t)|}{a_0(t)} \cdot 100 \%. \quad (16)$$

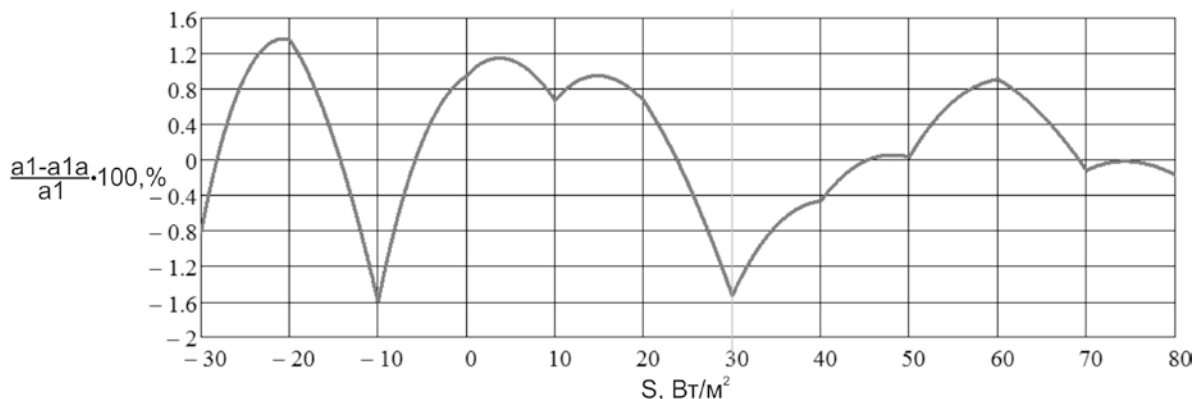


Рис. 4. Відносна похибка між інтерполяцією та апроксимацією залежності $a_1(t)$

На рис. 5 зображено графік відносної похибки для інтерпольованої та отриманої апроксимованої кривої ($a_0(t)$ та $a_0a(t)$ відповідно), з якого видно, що в усьому діапазоні допустимих робочих температур фотоелектричного перетворювача відносна похибка апроксимації за модулем не перевищує 0,071 %.

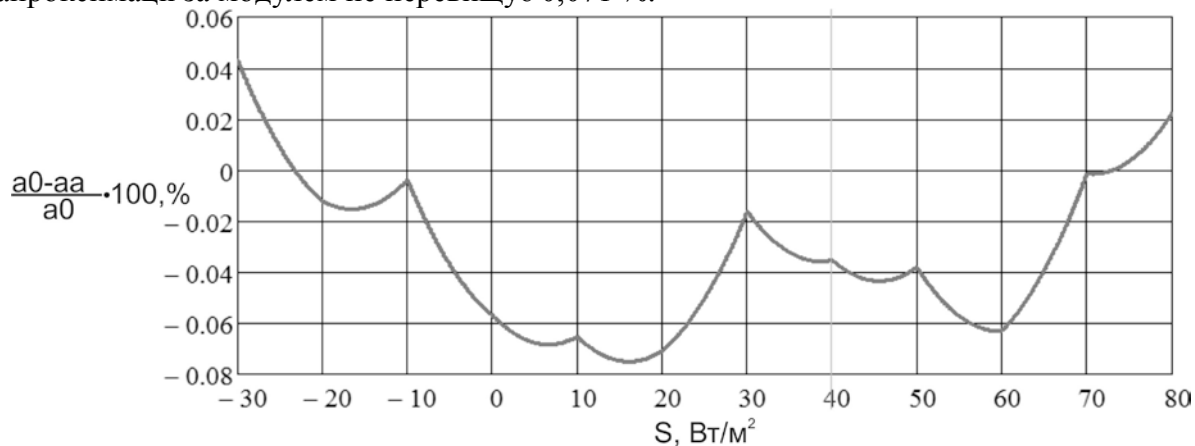


Рис. 5. Відносна похибка між інтерполяцією та апроксимацією залежності $a_0(t)$

Тепер можна повернутися до початкової задачі – отримання аналітичного виразу для поверхні керування, бо на цей момент ми вже маємо всі необхідні співвідношення та апроксимаційні поліноми. Остаточний вираз буде мати вигляд:

$$R(S, t) = Ra(S, t) = \frac{xa(t)}{S^{a_1a(t) \cdot S + a_0a(t)}}. \tag{17}$$

Отже, в результаті послідовного виконання всіх описаних кроків аналітично була одержана поверхня регулювання як функція двох змінних, загальний вигляд якої представлено нижче на рис. 6. Візуалізація отриманої поверхні здійснювалася за допомогою пакета MATLAB (функція surf()).

Покладемо значення m рівним 2, тобто поправочна функція має вигляд:

$$K_i(S) | t_i = a_2 \cdot S^2 + a_1 \cdot S + a_0. \tag{18}$$

Тоді апроксимаційна функція набуде вигляду:

$$Ra_i = \frac{x_i}{S^{a_2 \cdot S^2 + a_1 \cdot S + a_0}} | t_i. \tag{19}$$

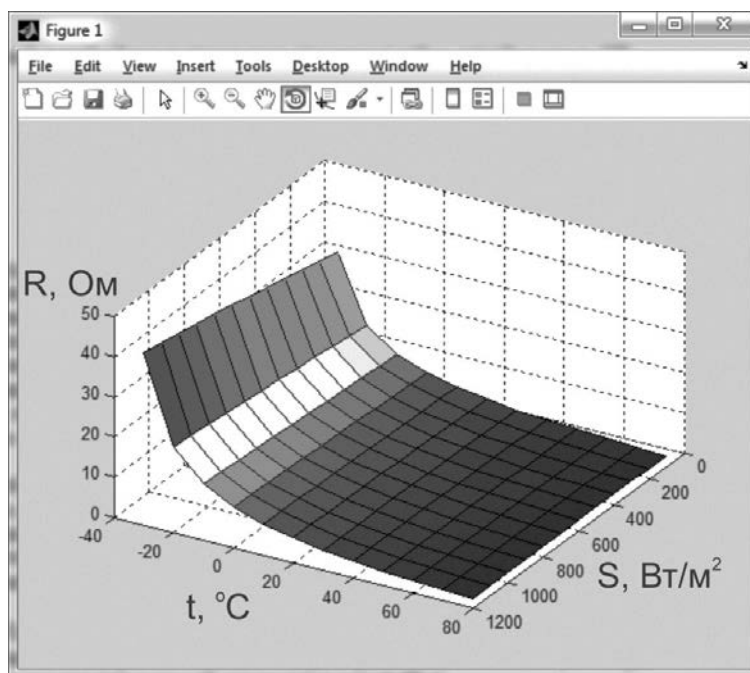


Рис. 6. Загальний вигляд одержаної регулюючої поверхні згідно зі співвідношенням (17)

Тепер поправочну функцію для кожної з експериментальних кривих будемо апроксимувати за допомогою функції виду (18). Для обрахування значень коефіцієнтів a_2 , a_1 і a_0 оберемо 3 точки. Будемо обчислювати значення коефіцієнтів залежності у точках, де значення густини потоку сонячного випромінювання становить $S_1 = 200 \text{ Вт/м}^2$, $S_2 = 600 \text{ Вт/м}^2$ та $S_3 = 1000 \text{ Вт/м}^2$. Точка S_1 знаходиться за межами діапазону доцільного використання, але її значення обиралися з міркувань забезпечення рівномірності проміжку отримання коефіцієнтів розкладу полінома виду (18).

Значення постійної величини x_i підбирається у точці S_3 . При цьому значення полінома степені знаменника залежності (19) рівний 1. Після цього виконується перехід до точок S_1 та S_2 . Для незмінного чисельника підбираються значення полінома степені знаменника, для цього складаються вирази виду:

$$200^{y_1} = \frac{x_i}{R_i(200)}, 600^{y_2} = \frac{x_i}{R_i(600)}. \quad (20)$$

Після того, як будуть підібрані показники степеня y_1 та y_2 , обчислимо значення невідомих коефіцієнтів розкладу полінома (18), для чого складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_2 \cdot 200^2 + a_1 \cdot 200 + a_0 = y_1; \\ a_2 \cdot 600^2 + a_1 \cdot 600 + a_0 = y_2; \\ a_2 \cdot 1000^2 + a_1 \cdot 1000 + a_0 = 1. \end{cases} \quad (21)$$

Після розв'язання системи (21) методом Крамера отримали наступну апроксимаційну функцію (відповідає робочій температурі $-30 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$Ra_1 = \frac{3090}{S^{-8,53516 \cdot 10^{-10} \cdot S^2 + 1,14783 \cdot 10^{-5} \cdot S + 0,98938}} | t_1. \quad (22)$$

Після виконання зазначених дій отримали апроксимації для всіх функцій виду (20).

Обчислення відносної похибки для апроксимації за формулою (10) показали, що в діапазоні доцільного функціонування фотоелектричного перетворювача вона за моду-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

лем не перевищує 0,8 % за будь-яких значень робочої температури, що свідчить про високу точність отримання апроксимації.

Після виконання всіх кроків була отримана апроксимація для сімейства залежностей виду (19). Кожна з апроксимуючих функцій має схожі значення коефіцієнтів a_2 , a_1 , a_0 та x , тому проведемо апроксимацію для кожного з цих параметрів окремо. Значення отриманих коефіцієнтів поправочних функцій наведено нижче в табл. 2.

Таблиця 2

Коефіцієнти одержаних апроксимуючих функцій виду (20)

Робоча температура, °C	Значення коефіцієнтів апроксимуючих функцій			
	x	a_2	a_1	a_0
-30	3090	$-8,53516 \cdot 10^{-10}$	$1,14783 \cdot 10^{-5}$	0,98938
-20	3160	$-2,44813 \cdot 10^{-9}$	$1,65721 \cdot 10^{-5}$	0,98587
-10	3220	$-3,24547 \cdot 10^{-9}$	$2,11270 \cdot 10^{-5}$	0,98212
0	3270	$-3,64719 \cdot 10^{-9}$	$2,54152 \cdot 10^{-5}$	0,97823
10	3310	$-6,13945 \cdot 10^{-9}$	$3,27513 \cdot 10^{-5}$	0,97339
20	3335	$-8,70531 \cdot 10^{-9}$	$4,08684 \cdot 10^{-5}$	0,96784
30	3345	$-8,51062 \cdot 10^{-9}$	$4,62175 \cdot 10^{-5}$	0,96230
40	3345	$-1,24567 \cdot 10^{-8}$	$5,70198 \cdot 10^{-5}$	0,95544
50	3325	$-1,38242 \cdot 10^{-8}$	$6,56737 \cdot 10^{-5}$	0,94815
60	3295	$-1,79177 \cdot 10^{-8}$	$7,79671 \cdot 10^{-5}$	0,93995
70	3245	$-2,03546 \cdot 10^{-8}$	$8,94072 \cdot 10^{-5}$	0,93095
80	3205	$-2,75419 \cdot 10^{-8}$	$1,10000 \cdot 10^{-4}$	0,92210

Після проведення експериментів встановлено, що найбільш оптимально і точно залежність коефіцієнта x від температури можна апроксимувати поліномом виду:

$$xa(t) = -1,8778 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0,0636 \cdot t^2 + 4,2868 \cdot t + 3272,5. \tag{23}$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (12) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 0,3 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_2(t)$ має вигляд:

$$a_2a(t) = -1,7835 \cdot 10^{-12} \cdot t^2 - 1,3008 \cdot 10^{-10} \cdot t - 3,9783 \cdot 10^{-9}. \tag{24}$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою, аналогічною (14), показали, що майже в усьому діапазоні робочих температур вона за модулем знаходиться в межах 16 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_1(t)$ має вигляд:

$$a_1a(t) = 2,3404 \cdot 10^{-14} \cdot t^5 - 2,1552 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 + 2,4443 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 + 5,9235 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 5,6526 \cdot 10^{-7} \cdot t + 2,6092 \cdot 10^{-5}. \tag{25}$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (14) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 3,56 %.

Нарешті, апроксимаційний поліном для залежності $a_0(t)$ має вигляд:

$$a_0a(t) = 2,154 \cdot 10^{-12} \cdot t^5 - 1,1144 \cdot 10^{-10} \cdot t^4 - 1,5448 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 2,3929 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 4,4037 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,978. \tag{26}$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (16) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 0,027 %.

Отже, остаточний аналітичний вираз для поверхні керування має вигляд:

$$R(S,t) = Ra(S,t) = \frac{xa(t)}{S^{a_2a(t) \cdot S^2 + a_1a(t) \cdot S + a_0a(t)}}. \tag{27}$$

Покладемо значення m рівним 3, тобто поправочна функція буде мати вигляд:

$$K_i(S) | t_i = a_3 \cdot S^3 + a_2 \cdot S^2 + a_1 \cdot S + a_0. \quad (28)$$

Тоді апроксимаційна функція набуде вигляду:

$$Ra_i = \frac{x_i}{S^{a_3 \cdot S^3 + a_2 \cdot S^2 + a_1 \cdot S + a_0}} | t_i. \quad (29)$$

Тепер поправочну функцію для кожної з експериментальних кривих будемо апроксимувати за допомогою функції виду (28). Для обрахування значень коефіцієнтів a_3 , a_2 , a_1 і a_0 цієї прямої оберемо 4 точки. Будемо обчислювати значення коефіцієнтів залежності у точках, де значення густини потоку сонячного випромінювання становить $S_1 = 200 \text{ Вт/м}^2$, $S_2 = 500 \text{ Вт/м}^2$, $S_3 = 800 \text{ Вт/м}^2$ та $S_4 = 1100 \text{ Вт/м}^2$. Точки S_1 та S_4 також обиралися з метою забезпечення рівномірності проміжку отримання коефіцієнтів розкладу полінома (28).

Значення постійної величини x_i підбирається у точці S_4 . При цьому, значення поліному степені знаменника залежності (29) рівний 1. Після цього виконується перехід до точок S_1 , S_2 та S_3 . Для незмінного чисельника підбираються значення поліному степені знаменника, для цього складаються вирази виду:

$$200^{y_1} = \frac{x_i}{R_i(200)}, 500^{y_2} = \frac{x_i}{R_i(500)}, 800^{y_3} = \frac{x_i}{R_i(800)}. \quad (30)$$

Після того, як будуть підібрані показники степеня y_1 , y_2 та y_3 , обчислимо значення невідомих коефіцієнтів розкладу полінома (28), для чого складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_3 \cdot 200^3 + a_2 \cdot 200^2 + a_1 \cdot 200 + a_0 = y_1; \\ a_3 \cdot 500^3 + a_2 \cdot 500^2 + a_1 \cdot 500 + a_0 = y_2; \\ a_3 \cdot 800^3 + a_2 \cdot 800^2 + a_1 \cdot 800 + a_0 = y_3; \\ a_3 \cdot 1100^3 + a_2 \cdot 1100^2 + a_1 \cdot 1100 + a_0 = 1. \end{cases} \quad (31)$$

Після розв'язання системи (31) методом Крамера отримали наступну апроксимаційну функцію (відповідає робочій температурі $-30 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$Ra_1 = \frac{3063.5}{S^{-3,5258 \cdot 10^{-12} \cdot S^3 + 6,22284 \cdot 10^{-9} \cdot S^2 + 8,19195 \cdot 10^{-6} \cdot S + 0,98815}} | t_1. \quad (32)$$

Після виконання зазначених дій отримано апроксимації для всіх функцій виду (29).

Обчислення відносної похибки для апроксимації за формулою (10) показали, що в діапазоні доцільного функціонування фотоелектричного перетворювача, вона за модулем не перевищує 0,2 % за будь-яких значень робочої температури, що свідчить про високу точність отримання апроксимації.

Після виконання всіх кроків була отримана апроксимація для сімейства залежностей виду (29). Кожна з апроксимуючих функцій має схожі значення коефіцієнтів a_3 , a_2 , a_1 , a_0 та x_i , тому проведемо апроксимацію для кожного з цих параметрів окремо.

Після проведення експериментів встановлено, що найбільш оптимально й точно залежність коефіцієнта x від температури можна апроксимувати поліномом виду:

$$\begin{aligned} xa(t) = & 7,9327 \cdot 10^{-8} \cdot t^5 - 3,8061 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 - 2,5681 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - \\ & - 0,0609 \cdot t^2 + 3,7076 \cdot t + 3227,4. \end{aligned} \quad (33)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (12) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 0,1 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_3(t)$ має вигляд:

$$a_3 a(t) = -4,8583 \cdot 10^{-20} \cdot t^5 + 2,8889 \cdot 10^{-18} \cdot t^4 + 1,2301 \cdot 10^{-16} \cdot t^3 - 6,6037 \cdot 10^{-15} \cdot t^2 + 1,7121 \cdot 10^{-13} \cdot t + 7,649 \cdot 10^{-12}. \quad (34)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою, аналогічною (14), показали, що майже в усьому діапазоні робочих температур вона за модулем знаходиться в межах 20 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_2(t)$ має вигляд:

$$a_2 a(t) = 3,1564 \cdot 10^{-17} \cdot t^5 - 3,2967 \cdot 10^{-16} \cdot t^4 - 2,4047 \cdot 10^{-13} \cdot t^3 + 5,8962 \cdot 10^{-12} \cdot t^2 - 4,5488 \cdot 10^{-10} \cdot t - 1,8459 \cdot 10^{-8}. \quad (35)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою, аналогічною (14), показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 8,9 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_1(t)$ має вигляд:

$$a_1 a(t) = -2,4685 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 + 2,3012 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 + 2,4257 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 6,9123 \cdot 10^{-7} \cdot t + 3,4521 \cdot 10^{-5}. \quad (36)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (14) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 5,4 %.

Нарешті, апроксимаційний поліном для залежності $a_0(t)$ має вигляд:

$$a_0 a(t) = 6,8354 \cdot 10^{-12} \cdot t^5 - 2,4206 \cdot 10^{-10} \cdot t^4 - 3,4893 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 2,2734 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 5,0747 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,9743. \quad (37)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (16) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 0,046 %.

Отже, остаточний аналітичний вираз для поверхні керування має вигляд:

$$R(S, t) = Ra(S, t) = \frac{xa(t)}{S^{a_3 a(t) \cdot S^3 + a_2 a(t) \cdot S^2 + a_1 a(t) \cdot S + a_0 a(t)}}. \quad (38)$$

Насамкінець, покладемо значення m рівним 4, тобто поправочна функція має вид:

$$K_i(S) | t_i = a_4 \cdot S^4 + a_3 \cdot S^3 + a_2 \cdot S^2 + a_1 \cdot S + a_0. \quad (39)$$

Тоді апроксимаційна функція буде мати вигляд:

$$Ra_i = \frac{x_i}{S^{a_4 \cdot S^4 + a_3 \cdot S^3 + a_2 \cdot S^2 + a_1 \cdot S + a_0}} | t_i. \quad (40)$$

Тепер поправочну функцію для кожної з експериментальних кривих будемо апроксимувати за допомогою функції виду (39). Для обрахування значень коефіцієнтів a_4 , a_3 , a_2 , a_1 і a_0 цієї прямої оберемо 5 точок. Будемо обчислювати значення коефіцієнтів залежності у точках, де значення густини потоку сонячного випромінювання становить $S_1 = 200 \text{ Вт/м}^2$, $S_2 = 400 \text{ Вт/м}^2$, $S_3 = 600 \text{ Вт/м}^2$, $S_4 = 800 \text{ Вт/м}^2$ та $S_5 = 1000 \text{ Вт/м}^2$.

Значення постійної величини x_i підбирається у точці S_5 . При цьому значення полінома степені знаменника залежності (40) рівний 1. Після цього виконується перехід до

точок S_1 , S_2 , S_3 та S_4 . Для незмінного чисельника підбираються значення полінома степені знаменника, для цього складаються вирази виду:

$$200^{y_1} = \frac{x_i}{R_i(200)}, 400^{y_2} = \frac{x_i}{R_i(400)}, 600^{y_3} = \frac{x_i}{R_i(600)}, 800^{y_4} = \frac{x_i}{R_i(800)}. \quad (41)$$

Після того, як будуть підібрані показники степеня y_1 , y_2 , y_3 та y_4 , обчислимо значення невідомих коефіцієнтів розкладу полінома (39), для чого складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_4 \cdot 200^4 + a_3 \cdot 200^3 + a_2 \cdot 200^2 + a_1 \cdot 200 + a_0 = y_1; \\ a_4 \cdot 400^4 + a_3 \cdot 400^3 + a_2 \cdot 400^2 + a_1 \cdot 400 + a_0 = y_2; \\ a_4 \cdot 600^4 + a_3 \cdot 600^3 + a_2 \cdot 600^2 + a_1 \cdot 600 + a_0 = y_3; \\ a_4 \cdot 800^4 + a_3 \cdot 800^3 + a_2 \cdot 800^2 + a_1 \cdot 800 + a_0 = y_4; \\ a_4 \cdot 1000^4 + a_3 \cdot 1000^3 + a_2 \cdot 1000^2 + a_1 \cdot 1000 + a_0 = 1. \end{cases} \quad (42)$$

Після розв'язання системи (42) методом Крамера отримали наступну апроксимаційну функцію (відповідає робочій температурі -30°C):

$$Ra_1 = \frac{3090}{S^{-8,10578 \cdot 10^{-15} \cdot S^4 + 1,44735 \cdot 10^{-11} \cdot S^3 - 8,13685 \cdot 10^{-9} \cdot S^2 + 1,24017 \cdot 10^{-5} \cdot S + 0,98937}} | t_1. \quad (43)$$

Після виконання зазначених дій отримано апроксимації для всіх функцій виду (40).

Обчислення відносної похибки для апроксимації за формулою (10) показали, що в діапазоні доцільного функціонування фотоелектричного перетворювача, вона за модулем не перевищує 0,2 % за будь-яких значень робочої температури, що свідчить про високу точність отримання апроксимації.

Після виконання всіх кроків була отримана апроксимація для сімейства залежностей виду (40). Кожна з апроксимуючих функцій має схожі значення коефіцієнтів a_4 , a_3 , a_2 , a_1 , a_0 та x_i , тому проведемо апроксимацію для кожного з цих параметрів окремо.

Після проведення експериментів встановлено, що найбільш оптимально й точно залежність коефіцієнта x від температури можна апроксимувати поліномом виду:

$$xa(t) = -1,8778 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0,0636 \cdot t^2 + 4,2868 \cdot t + 3272,5. \quad (44)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (12) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 0,3 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_4(t)$ має вигляд:

$$\begin{aligned} a_4a(t) = & -8,5364 \cdot 10^{-23} \cdot t^5 + 5,8647 \cdot 10^{-21} \cdot t^4 + 3,5618 \cdot 10^{-19} \cdot t^3 - \\ & - 3,0432 \cdot 10^{-17} \cdot t^2 - 5,0893 \cdot 10^{-16} \cdot t + 8,3748 \cdot 10^{-15}. \end{aligned} \quad (45)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою, аналогічною (14), показали, що майже в усьому діапазоні робочих температур вона за модулем знаходиться в межах 40 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_3(t)$ має вигляд:

$$\begin{aligned} a_3a(t) = & 1,0822 \cdot 10^{-17} \cdot t^4 - 1,2872 \cdot 10^{-15} \cdot t^3 + 4,4853 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + \\ & + 1,9888 \cdot 10^{-12} \cdot t - 9,1518 \cdot 10^{-12}. \end{aligned} \quad (46)$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою, аналогічною (14), показали, що майже в усьому діапазоні робочих температур вона за модулем знаходиться в межах 40 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_2(t)$ має вигляд:

$$a_2a(t) = -8,7433 \cdot 10^{-15} \cdot t^4 + 1,0281 \cdot 10^{-12} \cdot t^3 - 3,6326 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 - 2,0834 \cdot 10^{-9} \cdot t - 3,7412 \cdot 10^{-9}. \quad (47)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою, аналогічною (14), показали, що майже в усьому діапазоні робочих температур вона за модулем знаходиться в межах 60 %.

Апроксимаційний поліном для залежності $a_1(t)$ має вигляд:

$$a_1a(t) = 2,4014 \cdot 10^{-15} \cdot t^6 - 2,8752 \cdot 10^{-13} \cdot t^5 + 6,5449 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 + 1,2689 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 + 7,6302 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 1,1492 \cdot 10^{-6} \cdot t + 2,993 \cdot 10^{-5}. \quad (48)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (14) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 25 %.

Нарешті, апроксимаційний поліном для залежності $a_0(t)$ має вигляд:

$$a_0a(t) = -1,1946 \cdot 10^{-10} \cdot t^4 + 1,3557 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 3,9054 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 5,2171 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,9777. \quad (49)$$

Обчислення відносної похибки для отриманої апроксимації за формулою (16) показали, що в діапазоні робочих температур вона за модулем не перевищує 0,18 %.

Отже, остаточний аналітичний вираз для поверхні керування має вигляд:

$$R(S, t) = Ra(S, t) = \frac{\chi a(t)}{S^{a_4a(t) \cdot S^4 + a_3a(t) \cdot S^3 + a_2a(t) \cdot S^2 + a_1a(t) \cdot S + a_0a(t)}}. \quad (50)$$

Висновки. У статті запропоновано та описано послідовність кроків, в результаті виконання яких було отримано декілька поверхонь регулювання для системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача.

Аналіз універсальної апроксимації виду (17) показав, що при всіх значеннях робочої температури фотоелектричного перетворювача відносна похибка за модулем:

- не перевищує 1,6 % у діапазоні доцільного використання (300–1000 Вт/м²);
- не перевищує 6,3 % поза межами діапазону доцільного використання.

Аналіз відносної похибки для універсальної апроксимації виду (27) показав, що:

- вона не перевищує 4,51 % у діапазоні доцільного використання;
- вона не перевищує 7,2 % поза межами діапазону доцільного використання.

Аналіз відносної похибки для універсальної апроксимації виду (38) показав, що:

- вона не перевищує 6,26 % у діапазоні доцільного використання;
- вона не перевищує 9,32 % поза межами діапазону доцільного використання.

Аналіз відносної похибки для універсальної апроксимації виду (50) показав, що:

- вона не перевищує 4,57 % у діапазоні доцільного використання;
- вона не перевищує 4,17 % поза межами діапазону доцільного використання.

З наведеного вище стає очевидним, що універсальна апроксимація виду (17) є найбільш доцільною для подальшого використання, оскільки вона забезпечує найменшу відносну похибку обчислення величини опору навантаження фотоелектричного перетворювача. Тобто оптимальне значення ступеня полінома знаменника поправочної функції є 1. Також зрозуміло, що запропонована апроксимація забезпечує значно меншу відносну похибку, ніж та, що запропонована в [2].

Список використаних джерел

1. Іванець С. А. Використання нечіткої логіки в системах відстеження точки максимальної потужності фотоелектричних перетворювачів / С. А. Іванець, О. В. Красножон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2014. – № 2 (73). – С. 180–187.
2. Іванець С. А. Отримання аналітичного опису поверхні керування для системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача / С. А. Іванець, О. В. Красножон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2015. – № 2 (78). – С. 187–196.
3. Кобец Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М. : ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
4. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
5. Altas I. H. A Photovoltaic Array Simulation Model for MATLAB-Simulink GUI Environment / I. H. Altas, A.M. Sharaf. – 5 p.

References

1. Ivanets, S. A., Krasnozhan, O. V. (2014). Vykorystannia nechtikoi lohiky v systemakh vidstezhennia tochy maksimalnoi potuzhnosti fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv [Using fuzzy logic systems tracking the maximum power point of photovoltaic cells]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Seriya "Tekhnichni nauky" – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences"*, no. 2 (73), pp. 180–187 (in Ukrainian).
2. Ivanets, S. A., Krasnozhan, O. V. (2015). Otrymannia analitychnoho opysu poverkhni keruvannia dlia systemy vidstezhennia tochy maksimalnoi potuzhnosti fotoelektrychnoho peretvoriuvacha [Preparation of analytical description of the control surface system for tracking the maximum power point of the photovoltaic inverter]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Seriya "Tekhnichni nauky" – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences"*, no. 2 (78), pp. 187–196 (in Ukrainian).
3. Kobets, B. B., Volkova, I. O. (2010). *Innovatsionnoe razvitiie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid [Innovative development of the electric power on the basis of the concept of Smart Grid]*. Moscow: IATS Energiia, 208 p. (in Russian).
4. Chernykh, I. V. (2007). *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in the MATLAB and Simulink SimPowerSystems]*. Moscow: DMK Press, 288 p. (in Russian).
5. Altas, I. H., Sharaf, A.M. (2007). A Photovoltaic Array Simulation Model for MATLAB-Simulink GUI Environment. *Proceedings from IEEE International Conference on clean Electrical Power, ICCEP 2007, Capri, Italy*, pp. 341–345.

Іванець Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Іванець Сергій Анатолійович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинских радиоэлектронных аппаратов и систем, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Ivanets Sergey – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: sergey.ivanets@gmail.com

Красножон Олексій Васильович – асистент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Красножон Алексей Васильевич – асистент кафедры информационных и компьютерных систем, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Krasnozhan Oleksii – assistant of Department of Information and Computer Systems, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: wingcommander@ngs.ru

УДК 377.3

Світлана Коваленко

ГРАФІЧНА СКЛАДОВА ПРОФЕСІЙНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ МАЙБУТНЬОГО ІНЖЕНЕРА-БУДІВЕЛЬНИКА

Светлана Коваленко

ГРАФИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ БУДУЩЕГО ИНЖЕНЕРА-СТРОИТЕЛЯ

Svitlana Kovalenko

GRAPHIC PART OF PROFESSIONAL COMPETENCE FUTURE CIVIL ENGINEER

Розглянуто поняття, сутність, структуру та складові професійної компетентності фахівця. Виділено та досліджено одну із фундаментальних компонент професійної компетентності інженера-будівельника – графічну, яка уможливує виконання ним у кінцевому результаті робіт з проектування і конструювання будівельних об'єктів. Розглянуто співвідношення дефініції «графічна компетентність» з близькими за змістом поняттями, які тим чи іншим чином стосуються графічної підготовки майбутнього інженера-будівельника. Визначено сутність поняття, які розкривають зміст графічної підготовки майбутніх інженерів-будівельників.

Ключові слова: графічна компетентність, графічна діяльність, графічні здібності, графічна культура, графічна мова, графічна підготовка.

Бібл.: 10.

Рассмотрены понятие, сущность, структура и составляющие профессиональной компетентности специалиста. Выделена и исследована одна из фундаментальных компонент профессиональной компетентности инженера-