

2. *Wei Zhang, Lin Yi* The design of ATmega32 MCU SPI and MAX191 serial A/D communication // Business Management and Electronic Information (BMEI), 2011 International Conference on 13–15 May 2011 (Volume 2). – P. 526–528.
3. *Zhu Zhengwei, Zhao Huihui, Shen Lin* Design of Multi-machine Communication System Based on TWI // Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on 25–27 June 2010. – P. 3590–3593.
4. *Joseph Yiu*. The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors, Third Edition / Burlington : Elsevier, 2007.
5. *Jonathan W. Valvano* Embedded Systems: Real-Time Interfacing to the Arm Cortex-M Microcontrollers // CreateSpace Independent Publishing Platform, 2011.
6. *Патент* України на корисну модель № 94622. Світлодіодно-галогеновий освітлювач. – Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.11.2014 р.
7. *Chin M., Kilpatrick S., Osgood R.* Metal-Insulator-Metal Diode Process Development for Energy Harvesting Applications / Army Research Laboratory, Annual Report. – 2010. – 24 p.
8. *Lee. K.-J., Kim J.-H., Kim H.-S. et al.* Study on a Solar Simulator for Dye Sensitized Solar Cells // International Journal of Photoenergy. – 2012. – Vol. 12. – P. 1–11.
9. *Pravettoni M., Galleano R., Dunlop E. et al.* Characterization of a pulsed solar simulator for concentrator photovoltaic cell calibration / Measurement science and technology. – 2010. – Vol. 21. – P. 1–8.
10. *Emery K.* Measurement and characterization of solar cells and modules // Handbook of photovoltaic science and engineering / Ed. by A. Luque and S. Hegedus. – Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003. – P. 702–752.
11. *Колтун М. М.* Солнечные элементы / М. М. Колтун. – М. : Наука, 1987. – 210 с.

УДК 621.316

С.А. Іванець, канд. техн. наук

О.В. Красножон, аспірант

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОТРИМАННЯ АНАЛІТИЧНОГО ОПИСУ ПОВЕРХНІ КЕРУВАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

С.А. Іванець, канд. техн. наук

А.В. Красножон, аспірант

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Serhii Ivanets, PhD in Technical Sciences

Oleksii Krasnozhon, PhD student

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

OBTAINING OF AN ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE CONTROL SURFACE FOR THE SYSTEM TRACKING MAXIMUM POWER POINT OF A PHOTOVOLTAIC CELL

Проведено загальний аналіз алгоритмів функціонування систем відстеження точки максимальної потужності фотоелектричних перетворювачів. Запропоновано метод побудови таких систем, що ґрунтується на отриманні поверхні керування (завдяки інтерполяції та апроксимації) як функції двох змінних: густини потоку падаючого сонячного випромінювання та робочої температури фотоелектричного перетворювача. Обґрунтовано вибір поліномів для апроксимації інтерпольованих експериментальних даних, отриманих за допомогою моделювання роботи реально наявного фотоелектричного перетворювача. Наведено оцінювання похибок для запропонованих поліномів. Проаналізовано переваги та недоліки запропонованого методу.

Ключові слова: максимальна потужність, поверхня регулювання, інтерполяція експериментальних даних, апроксимаційний поліном, поправочна функція, відносна похибка, реперна точка, функція двох змінних, дослідна модель фотоелектричного перетворювача.

Проведён обший анализ алгоритмов функционирования систем отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей. Предложен 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 выбор полиномов для аппроксимации интерполированных экспериментальных данных, полученных путём моделирования работы реально существующего фотоэлектрического преобразователя. Приведена оценка погрешностей для предложенных полиномов. Проанализированы преимущества и недостатки предложенного метода.

Ключевые слова: максимальная мощность, поверхность регулирования, интерполяция экспериментальных данных, аппроксимационный полином, поправочная функция, относительная погрешность, реперная точка, функция двух переменных, экспериментальная модель фотоэлектрического преобразователя.

Conducted a general analysis of algorithms of functioning of systems for tracking the maximum power point of the photovoltaic. A method of constructing such systems, which is based on the preparation of the control surface (by interpolation and approximation) as a function of two variables: the flux density of fallen solar radiation and the operating temperature of the photovoltaic. The choice of polynomials to approximate the interpolated experimental data obtained by simulation of real-life photovoltaic. The estimation of errors for the proposed polynomials. The advantages and disadvantages of the proposed method.

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

Вступ. Згідно з концепцією «Smart Grid» впровадження таких джерел розподіленої генерації електричної енергії, як фотоелектричні перетворювачі, є доцільним, оскільки дозволяє отримувати суттєві переваги. Однак проблема побудови ефективних пристроїв для керування такими перетворювачами на сьогодні остаточно не вирішена. Внаслідок особливостей внутрішньої будови фотоелектричних перетворювачів координати точки максимальної потужності генерованої електричної енергії визначаються параметрами довкілля, а також робочою температурою самого пристрою, які не є постійними. Найголовніший параметр довкілля, що впливає на потужність генерації, – густина потоку падаючого сонячного випромінювання [1].

Оскільки стан атмосфери не є постійним, тому й густина потоку падаючого випромінювання постійно коливається, що вимагає керування режимом роботи фотоелектричного перетворювача. Саме для вирішення таких задач використовуються системи відстеження точки максимальної потужності. Очевидно, що внутрішня структура таких систем залежить від алгоритму їх функціонування. Існує кілька варіантів алгоритму функціонування таких систем.

Аналіз наявних алгоритмів функціонування систем відстеження точки максимальної потужності. У статті [2] зазначалося, що за методом побудови всі такі системи можна розділити на такі групи: методи, що ґрунтуються на зворотному зв'язку за напругою; методи, що ґрунтуються на зворотному зв'язку за струмом; методи, що ґрунтуються на спостереженнях за коливаннями потужності.

Алгоритми функціонування систем, що відносяться до першої групи, складаються з таких кроків: виміряти рівень вихідної напруги фотоелектричного перетворювача; виміряти рівень опорної напруги перетворювача; порівняти отримані величини між собою (наприклад, знайти різницю цих напруг); оцінити величину та знак цієї різниці; змінити опір навантаження фотоелектричного перетворювача певним чином.

Функціонування систем, що відносяться до другої групи, реалізується завдяки виконанню таких кроків: виміряти рівень вихідного струму фотоелектричного перетворювача; виміряти рівень опорного струму перетворювача; порівняти отримані величини між собою (наприклад, знайти різницю цих струмів); оцінити величину та знак цієї різниці; змінити опір навантаження фотоелектричного перетворювача певним чином.

Алгоритм функціонування системи із третьої групи має такі кроки: згенерувати коливання на вході фотоелектричного перетворювача таким чином, щоб змінилися його вихідні параметри; оцінити величину зміни вихідної потужності (знайти похідну); оцінити величину зміни вихідної напруги (знайти похідну); знайти відношення похідної потужності до похідної напруги; якщо величина відношення рівна 0, точку максималь-

ної потужності знайдено; якщо відношення похідних не дорівнює 0, виконати дії щодо зміни величини опору навантаження.

З наведеного аналізу легко зрозуміти, що пристрій керування в будь-якому з типів систем відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача оперує лише величинами параметрів самого перетворювача, крім того, в них безпосередньо не враховуються такі важливі фактори, як густина падаючого потоку сонячного випромінювання та робоча температура самого фотоелектричного перетворювача.

Мета статті. Враховуючи вищезазначене, можна припустити, що існує такий метод побудови систем відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача, який би, передусім, враховував зазначені фактори – густину потоку падаючого сонячного випромінювання та робочу температуру перетворювача.

Отже, метою цієї статті є спроба обґрунтувати та розробити метод побудови системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача на основі поверхні керування. Сама поверхня являє собою площину, тобто функцію двох змінних – густини падаючого потоку сонячного випромінювання та робочої температури фотоелектричного перетворювача. Як інструментальний набір для виконання поставлених цілей буде використовуватися оболонка Simulink програмного пакета MATLAB, а також математичний пакет Mathcad.

Виклад основного матеріалу. Як відомо, будь-яку математичну залежність можна представити декількома способами: аналітичним виразом, таблицею значень, графічно. Одним із найпростіших способів забезпечення функціонування пристрою керування режимом генерації енергії фотоелектричного перетворювача є встановлення ним величини вихідного опору на основі аналітичного виразу, тобто необхідно отримати залежність виду (1). Слід зазначити, що напівпровідникові фотоелектричні комірки, які входять до складу фотоелектричних перетворювачів, характеризуються низькою температурною стабільністю, тобто сильне перегрівання або охолодження перетворювача істотно знижують рівень генерації електричної енергії.

За відсутності можливості проводити вимірювання параметрів фотоелектричного перетворювача в лабораторних умовах скористаємося результатами моделювання. Для цього зберемо дослідну модель, яку зображено на рис. 1. Як параметри моделі фотоелектричного перетворювача будемо використовувати параметри реально наявного перетворювача KVAZAR KV-250M [3]:

$$R = f(S, t), \quad (1)$$

де R – опір навантаження фотоелектричного перетворювача, який забезпечує генерацію максимально можливої потужності електричної енергії (Ом);

S – густина потужності падаючого на поверхню перетворювача потоку сонячного випромінювання ($\text{Вт}/\text{м}^2$);

t – робоча температура фотоелектричного перетворювача ($^{\circ}\text{C}$).

Використовуючи модель, що зображено на рис. 1, можемо отримати таку таблицю значень (табл. 1) оптимального опору навантаження для фотоелектричного перетворювача при заданих величинах робочої температури та густини падаючого потоку сонячного випромінювання. Компонент “Parametr” запропонованої моделі – осцилограф, за показаннями якого і наповнювалася табл. 1. Враховуючи технічні характеристики великої кількості наявних фотоелектричних перетворювачів, був обраний діапазон допустимих значень та величина зміни значення для кожної зі змінних:

– для густини потоку падаючого сонячного випромінювання – $100\dots 1200 \text{ Вт}/\text{м}^2$, крок зміни – $100 \text{ Вт}/\text{м}^2$;

– для робочої температури – $30\dots +80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, крок зміни – $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

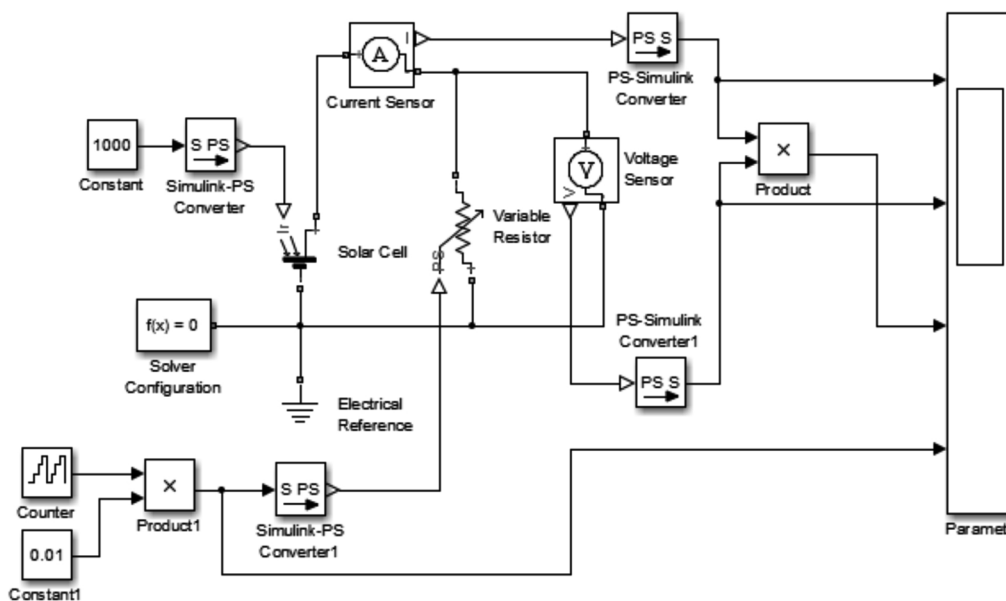


Рис. 1. Дослідна модель для отримання параметрів фотоелектричного перетворювача

Таблиця 1а

Оптимальні опори навантаження фотоелектричного перетворювача (для діапазону густин потоку сонячного випромінювання 100–600 Вт/м²)

Робоча температура, °C	Густина потоку падаючого сонячного випромінювання, Вт/м ²					
	100	200	300	400	500	600
-30	32,3	16,15	10,74	8,02	6,385	5,285
-20	33,5	16,74	11,1125	8,285	6,58	5,44
-10	34,71	17,32	11,475	8,54	6,775	5,59
0	35,95	17,875	11,825	8,785	6,95	5,73
10	37,09	18,43	12,16	9,015	7,12	5,85
20	38,25	18,97	12,485	9,23	7,27	5,955
30	39,42	19,4825	12,795	9,425	7,41	6,06
40	40,54	19,99	13,075	9,615	7,525	6,13
50	41,655	20,47	13,35	9,775	7,63	6,195
60	42,755	20,93	13,605	9,925	7,705	6,23
70	43,83	21,37	13,825	10,045	7,765	6,255
80	44,87	21,78	14,025	10,135	7,805	6,25

Таблиця 1б

Оптимальні опори навантаження фотоелектричного перетворювача (для діапазону густин потоку сонячного випромінювання 700–1200 Вт/м²)

Робоча температура, °C	Густина потоку падаючого сонячного випромінювання, Вт/м ²					
	700	800	900	1000	1100	1200
-30	4,5	3,91	3,455	3,09	2,785	2,535
-20	4,63	4,015	3,54	3,16	2,845	2,585
-10	4,75	4,115	3,615	3,22	2,895	2,625
0	4,85	4,195	3,68	3,27	2,935	2,655
10	4,945	4,265	3,735	3,31	2,96	2,67
20	5,025	4,32	3,775	3,335	2,98	2,68
30	5,09	4,365	3,795	3,345	2,975	2,67
40	5,135	4,39	3,805	3,345	2,965	2,65
50	5,165	4,395	3,805	3,325	2,935	2,615
60	5,175	4,385	3,775	3,295	2,9	2,58
70	5,165	4,365	3,74	3,245	2,855	2,55
80	5,14	4,32	3,695	3,205	2,825	2,545

За допомогою даних з табл. 1 можна побудувати сімейство функцій, кожна функція якого є залежністю виду:

$$R_i = f(S) | t_i, \quad (2)$$

де R_i – опір навантаження фотоелектричного перетворювача, при змінному значенні S та постійному значенні температури t_i ;

i – номер побудованої функції.

Таким чином, за допомогою пакета Mathcad спробуємо будувати сімейство функцій однієї змінної (очевидно, що таких функцій буде 12), оскільки інша змінна – температура – набуває сталого значення. Отже, за допомогою значень опорів, що містяться у рядках табл. 1, побудуємо спочатку лінійно інтерпольовану експериментальну криву, використовуючи вбудовані функції інтерполяції (наприклад, `linterp()`).

Також слід зазначити такий важливий факт: середовище Simulink пакета MATLAB, за допомогою якого отримуються необхідні дослідні дані, не дає змоги отримати значення опору навантаження фотоелектричного перетворювача при значенні густини потоку падаючого сонячного випромінювання, рівному 0 Вт/м^2 (оскільки при цьому опір навантаження є нескінченною величиною) [4]. Тому в табл. 1 відсутній відповідний стовпчик. Однак у процесі побудови сімейства функцій у пакеті Mathcad для вказаного випадку було вибрано фіксоване значення опору навантаження, рівне 1000 Ом . Очевидно, що такий вибір буде впливати на точність отримання подальших результатів.

Для більшої наочності на рис. 2 замість побудови графіків інтерпольованих експериментальних даних для усього температурного діапазону (від -30 до $+80 \text{ }^\circ\text{C}$) побудуємо лише дві криві для крайніх значень температури -30 та $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ ($R_1(S)$ та $R_{12}(S)$ відповідно). З аналізу отриманих кривих можна зробити такі висновки:

- збільшення робочої температури фотоелектричного перетворювача приводить до зростання величини опору навантаження (так, крива $R_{12}(S)$ проходить вище, ніж крива $R_1(S)$);
- всі наведені криві мають дуже характерний вигляд, наближений до гіперболічної функції.

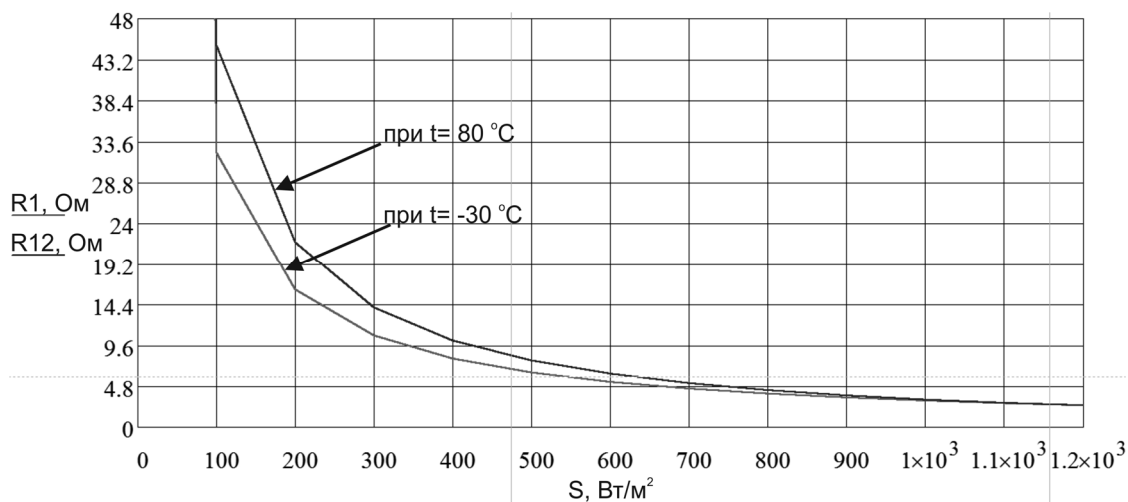


Рис. 2. Лінійно-інтерпольовані експериментальні дані для залежності опору навантаження фотоелектричного перетворювача від освітленості сонячного випромінювання при значеннях робочої температури перетворювача -30 та $+80 \text{ }^\circ\text{C}$

Використання інтерполяції дозволяє лише оцінити вигляд функції, для отримання аналітичного вигляду кожної з функцій слід виконувати апроксимацію. Для апроксимації було запропоновано використовувати гіперболічну функцію виду (3):

$$Ra_i = (K_i(S)/S) | t_i, \quad (3)$$

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.

У результаті проведення аналізу виявилось, що збіг інтерполяції з апроксимацією забезпечується за умови використання поправочної функції виду (4). Отже, для апроксимації залежності (3) будемо використовувати поправочну функцію $K_i(S) | t_i$ у вигляді:

$$K_i(S) | t_i = k \cdot S + c, \quad (4)$$

де k – коефіцієнт нахилу прямої;

c – вільний член, що визначає постійну складову.

Таким чином, поправочну функцію для кожної з дванадцяти експериментальних кривих будемо апроксимувати за допомогою лінійної функції (4). Для обрахування значень коефіцієнтів k і c цієї прямої необхідно обрати 2 будь-яких точки. Очевидно, що вибір координат цих точок буде істотно впливати на параметри режиму функціонування фотоелектричного перетворювача.

З аналізу особливостей функціонування фотоелектричного перетворювача випливає, що доцільність його використання (тобто прийнятні коефіцієнт корисної дії та величина потужності електричної енергії) забезпечується при значеннях густини падаючого потоку сонячного випромінювання в діапазоні 300–1000 Вт/м² [5; 6]. Використання фотоелектричних перетворювачів при значеннях густини потоку сонячного випромінювання менше за 300 Вт/м² не є доцільним і може призвести до нестабільної роботи, а значення густини потоку, більші за 1000 Вт/м², можуть траплятися лише в умовах пустелі. Отже, будемо обчислювати значення коефіцієнтів залежності (4) у точках, де значення густини падаючого потоку сонячного випромінювання становить $S_1 = 300$ Вт/м² та $S_2 = 1000$ Вт/м². Для цього будемо користуватися відомими формулами (5) та (6) відповідно:

$$k_i = \frac{K_i(S_2) - K_i(S_1)}{S_2 - S_1}, \quad (5)$$

$$c_i = K_i(S_1) - a \cdot S_1. \quad (6)$$

Після виконання зазначених вище дій було отримано апроксимації для всіх функцій виду (2). Для більшої наочності на рис. 3 попарно зображено інтерпольовану криву (має відповідне позначення $R_1(S)$) та отриману для неї апроксимацію ($Ra_1(S)$) при значенні робочої температури фотоелектричного перетворювача у -30 °С.

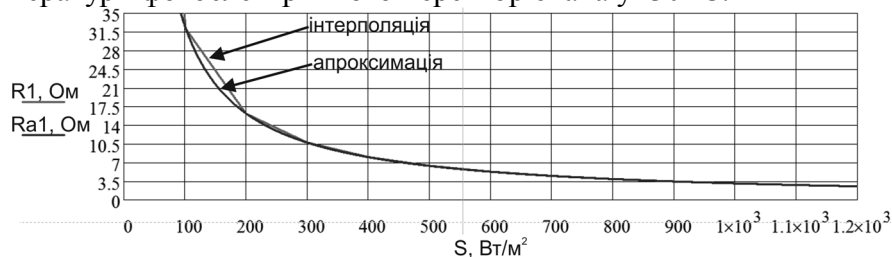


Рис. 3. Інтерполяція та отримана апроксимація залежності (2) при $t = -30$ °С

З метою перевірки точності та якості отриманих апроксимацій будемо обраховувати відносну похибку між відповідною апроксимацією та побудованою інтерполяцією за такою формулою:

$$\varepsilon = \frac{R_i(S) - Ra_i(S)}{R_i(S)} \cdot 100\% \quad (7)$$

Очевидно, що такі обчислення похибки проводилися при кожному із 12 значень температури (для більшої наочності на рис. 4 зображено графік відносної похибки між кривими, які містяться на рис. 3). З графіка видно і можна з упевненістю стверджувати, що в діапазоні доцільного функціонування фотоелектричного перетворювача відносна похибка апроксимації за модулем не перевищує значення у 1,2 % за будь-яких значень робочої температури, що свідчить про високу точність отримання апроксимації (також очевидно, що у контрольних точках 300 та 1000 Вт/м² відносна похибка взагалі нульова).

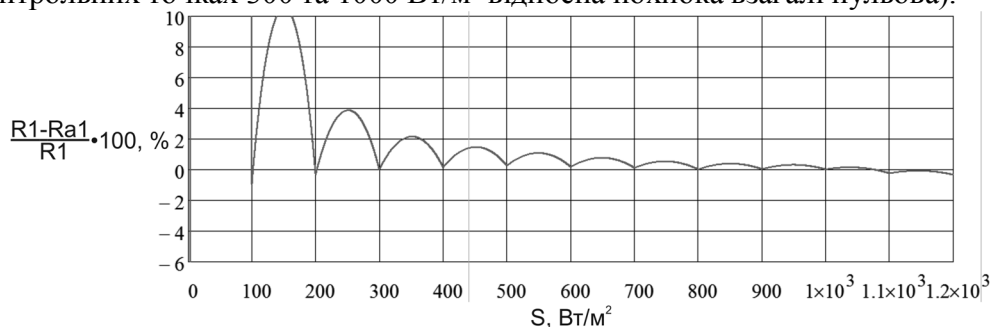


Рис. 4. Відносна похибка між інтерполяцією та апроксимацією залежності виду (2) при $t = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

“Параболічний” вигляд графіка, зображений на рис. 4, 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, слід опиратися на значення похибок лише у тих точках, значення густини потоку падаючого сонячного випромінювання яких відповідає наведеним у табл. 1.

Таким чином, після виконання всіх зазначених вище кроків були отримані апроксимації для всіх дванадцяти залежностей виду (2). Оскільки кожна з апроксимуючих прямих має схожі значення коефіцієнтів k і c можна спробувати провести апроксимацію для кожного з цих параметрів окремо, тобто знайти таку функцію, яка б з достатньою точністю описувала залежність виду (1). Таким чином, ми зможемо отримати поверхню керування, яку ми й шукаємо, оскільки в такому разі параметр робочої температури перестане бути сталою величиною. Значення отриманих коефіцієнтів поправочних функцій наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Коефіцієнти одержаних апроксимуючих поліномів

Робоча температура, °C	Значення коефіцієнтів поправочних функцій	
	k	c
-30	132	3278,571
-20	173,75	3408,236
-10	222,5	3537,857
0	277,5	3666,429
10	338	3792,857
20	410,5	3921,429
30	493,5	4050
40	577,5	4170
50	680	4296,429
60	786,5	4418,571
70	902,5	4534,286
80	1002,5	4637,143

З аналізу значень, які може набувати коефіцієнт k , видно, що його залежність від температури не є лінійною. Тому для апроксимації такої залежності слід використовувати нелінійний поліном (слід також враховувати, що використання поліномів дуже високих порядків не є ефективним). Отже, для вирішення такої задачі скористаємося функцією `polyfit()`, що входить до складу програмного пакета MATLAB. Однією з переваг її використання є можливість налаштування максимального ступеня апроксимуючого полінома.

Після виконання декількох експериментів було встановлено, що найбільш оптимально і точно залежність коефіцієнта k від температури можна апроксимувати поліномом другого порядку, що має вигляд:

$$ka(t) = 0,0396 \cdot t^2 + 6,0269 \cdot t + 277,1614. \quad (8)$$

Отже, вираз (8) і є загальний вигляд апроксимуючого полінома для залежності $ka(t)$. З метою перевірки точності та якості отриманої апроксимації будемо обраховувати відносну похибку між відповідною апроксимацією та побудованою інтерполяцією за такою формулою:

$$\varepsilon = \frac{k(t) - ka(t)}{k(t)} \cdot 100 \%. \quad (9)$$

На рис. 5 зображено графік відносної похибки для інтерпольованої та отриманої для неї апроксимованої кривої (мають відповідне позначення $k(t)$ та $ka(t)$), що дає підстави упевнено стверджувати, що в усьому діапазоні допустимих робочих температур фотоелектричного перетворювача відносна похибка апроксимації за модулем не перевищує значення у 1,3 %.

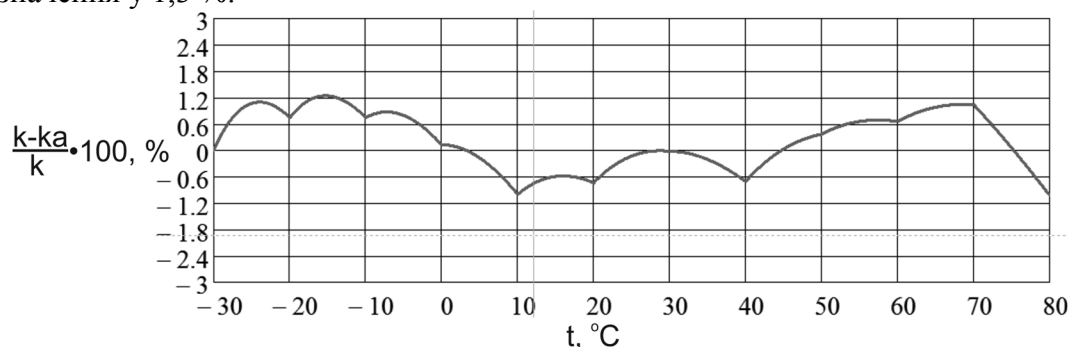


Рис. 5. Відносна похибка між інтерполяцією та апроксимацією залежності $k(t)$

Користуючись повністю аналогічними міркуваннями під час пошуку апроксимаційного полінома для залежності $c(t)$, можна одержати такі результати. Апроксимаційний поліном для такої залежності має вигляд:

$$ca(t) = \frac{880,7}{70} \cdot t + 3663,743. \quad (10)$$

З метою перевірки точності та якості отриманої апроксимації будемо обраховувати відносну похибку між відповідною апроксимацією та побудованою інтерполяцією за такою формулою:

$$\varepsilon = \frac{c(t) - ca(t)}{c(t)} \cdot 100 \%. \quad (11)$$

На рис. 6 зображено графік відносної похибки для інтерпольованої та отриманої для неї апроксимованої кривої (мають відповідне позначення $c(t)$ та $ca(t)$), що дає підстави впевнено стверджувати, що в усьому діапазоні допустимих робочих температур фотоелектричного перетворювача відносна похибка апроксимації за модулем не перевищує значення у 0,75 %.

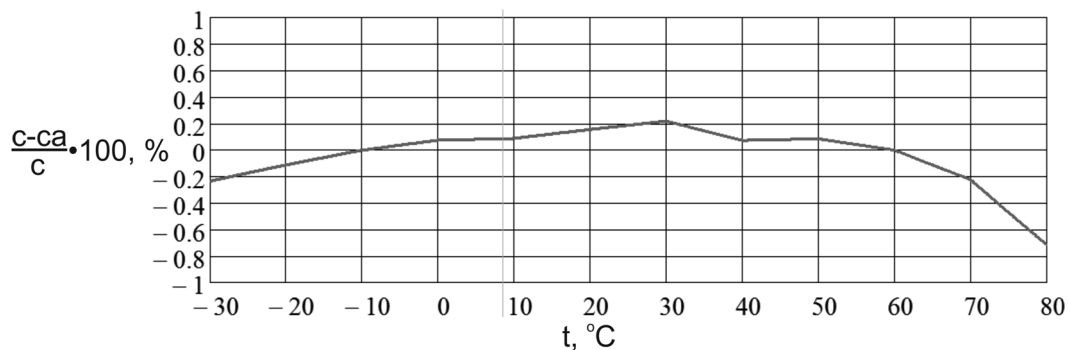


Рис. 6. Відносна похибка між інтерполяцією та апроксимацією залежності $c(t)$

Таким чином, тепер можна повернутися до вирішення початкової задачі – отримання аналітичного виразу для залежності (1). Очевидно, що на цей момент ми маємо всі необхідні для цього співвідношення та апроксимаційні поліноми. Остаточний вираз можна отримати, виконавши деяке перетворення для співвідношення (3):

$$R(S, t) = Ra(S, t) = \frac{Ka(S, t)}{S}. \quad (12)$$

У свою чергу, $K_a(S, t)$ можна знайти за допомогою раніше отриманого нами співвідношення:

$$Ka(S, t) = \frac{ka(t)}{700} \cdot S + ca(t). \quad (13)$$

Отже, в результаті послідовного виконання всіх описаних у статті кроків аналітично була одержана поверхня регулювання як функція двох змінних, загальний вигляд якої представлено на рис. 7. Візуалізація отриманої поверхні здійснювалася за допомогою пакета MATLAB (за допомогою функції `surf()`). Очевидно, що отримане співвідношення може використовуватися для обрахування дійсних значень опору навантаження фотоелектричного перетворювача з метою генерації ним електричної енергії з максимально можливою за цих умов потужністю.

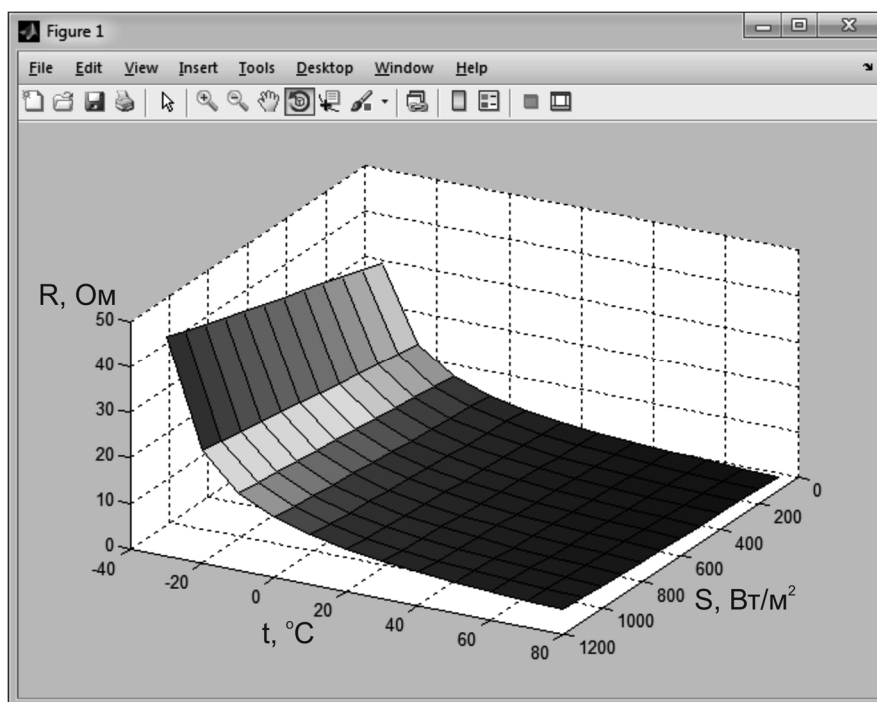


Рис. 7. Загальний вигляд одержаної регулюючої поверхні згідно зі співвідношенням (12)

Висновки. У статті запропоновано та описано послідовність кроків, у результаті виконання яких (за допомогою програмних засобів MATLAB, Simulink та Mathcad) була отримана поверхня регулювання на основі параметрів реально наявного фотоелектричного перетворювача з метою подальшої реалізації пристрою керування для системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача. Величини похибок, обраховані для запропонованих апроксимаційних поліномів, свідчать про достатньо високу точність отримання регулюючої поверхні.

Список використаних джерел

1. *Кобец Б. Б.* Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М. : ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
2. *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.
3. *Офіційний сайт компанії Kvazar* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.kvazar.com/images/stories/production/KV_220-255_M.PDF.
4. *Моделирование* электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
5. *Altas I. H., Sharaf A. M.* A Photovoltaic Array Simulation Model for MATLAB -Simulink GUI Environment. – 5 p.
6. *Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK* / Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, Yi-Jie Su // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. – 2008, October 22–24. – 6 p.