

Д. т. н. А. А. ЄФІМЕНКО, к. т. н. О. В. ЛОГВІНОВ, Л. І. ПРИСЯЖНЮК

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: bogachevalyuba523@gmail.com

## ВИКОРИСТАННЯ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ БАТАРЕЯМИ

*Наведено результати дослідження умов використання повного факторного експерименту для створення математичних моделей — рівнянь регресії з метою моделювання роботи сонячних батарей за умови скорочення обсягу необхідних для цього натурних випробувань. Показано, що точність моделювання суттєво залежить від діапазону значень факторів.*

*Ключові слова: сонячна батарея, моделювання, повний факторний експеримент, рівняння регресії.*

Ефективне генерування електричної енергії сонячними батареями (СБ) за різного їх положення відносно Сонця є одним із головних завдань при проектуванні багатобатарейних електростанцій (кластерів). Під ефективністю в цьому випадку слід розуміти досягнення оптимальної потужності сонячних батарей, що дозволило б отримувати в часі (протягом світлового дня, сезону, року) максимум електричної енергії.

Питанню підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій приділяється велика увага в різноманітних науково-технічних дослідженнях. Велика кількість досліджень, наприклад [1—5], присвячена визначенню оптимального кута нахилу та азимуту для встановлення сонячних батарей. Так, в роботі [1] на основі досліджень, що продемонстрували значно більший вплив азимуту Сонця, ніж кута підйому над горизонтом, у зв'язку з великими енергозатратами на переміщення сонячної батареї рекомендується забезпечити її автоматичний рух навколо вертикальної осі. При цьому передбачається також можливість зміни положення по горизонтальній осі 4—6 разів на рік. У [4] наведено результати досліджень експлуатації фотоелектричних панелей з різною орієнтацією для розв'язання проблем, пов'язаних зі зміною добового споживання електроенергії, з одного боку, і забезпечення властивостей і параметрів фотоелектричної потужності, з іншого. Автори [5] продемонстрували, що одним із найефективніших способів підвищення ефективності функціонування сонячних батарей є їх орієнтація за азимутом.

В роботі [6] досліджувалось функціонування в польових умовах двох сонячних батарей: одна була стаціонарно орієнтована на південь під кутом  $55^\circ$  до поверхні Землі; друга — постійно орієнтована на Сонце. Порівняння отриманої від

них електроенергії дозволило зробити такі висновки: наявність автоматичної орієнтації СБ в напрямку Сонця на відповідній території може суттєво підвищити вироблення електроенергії в весняний, літній та осінній періоди (до 40% в умовах проведення експерименту на півдні Томської області, РФ); зміна орієнтації батареї відносно сонячного світлового потоку призводить до збільшення часу, протягом якого її потужність є максимально можливою, при цьому коливання самої величини потужності є незначним.

Авторами [7—11] розглядаються питання підвищення ефективності сонячних батарей різними способами. Наприклад, у [10] наведено прогнозування ефективності проєктованої сонячної фотоелектричної системи, що містить аналіз впливу орієнтації панелей, характеристик її складових частин, докладне врахування втрат, параметри керування енергоспоживанням з використанням комп'ютерної програми.

Одним із напрямків удосконалення сонячних панелей є використання нових конструктивних рішень і матеріалів. Так, в [11] проведено експериментальне дослідження електричних характеристик нових фотоелектричних панелей на основі загартованого скла.

Аналіз показує, що для ефективного використання сонячних батарей пріоритетним є їх оптимальна орієнтація відносно Сонця [12]. В ідеальному випадку необхідно створювати системи стеження, які дозволяють оперативно змінювати орієнтацію СБ в напрямку Сонця [7] для їх перпендикулярного розташування до сонячного випромінювання. Використання механізмів стеження за положенням Сонця на небі (сонячних трекерів) протягом дня є досить поширеним способом розв'язання проблеми підвищення ефективності сонячних панелей [13, 14]. Однак



Рис. 1. Послідовність проведення досліджень

такі системи є достатньо складними з точки зору як механіки, так і електроніки, але найголовніше — для їх функціонування необхідні додаткові затрати електроенергії, що, природно, знижує їхню ефективність. Але це не означає, що питання орієнтації СБ не варти уваги і відповідної реалізації. Одним з напрямків підвищення ефективності роботи СБ може бути фіксоване розташування сонячних батарей різної орієнтації відносно Сонця у кластері сонячної електростанції.

Для створення таких електростанцій, а також перевірки ефективності інших рішень необхідні дані (моделі), які дозволяли б з достатньою точністю визначати оптимальне орієнтування окремих СБ для різних умов — залежно від місцеположення за широтою, пори року тощо.

Велика різноманітність умов експлуатації сонячних батарей, а значить і значна кількість вхідних факторів та обмежень, обумовлює необхідність великої кількості математичних моделей, які можуть з прийнятною точністю описувати залежність від них вихідної потужності СБ. Для цього, відповідно, потрібен і великий обсяг натурних випробувань. Щоб спростити створення математичних моделей і в першу чергу зменшити обсяг випробувань, пропонується використовувати повний факторний експеримент (ПФЕ) [15].

Метою цієї роботи є дослідження можливостей використання повного факторного експерименту для створення математичних моделей роботи сонячних батарей, які б в умовах мінімізації обсягу випробувань з достатньою точністю описували їх функціонування і дозволяли оптимізувати їх розташування відносно Сонця.

Дослідження умов використання повного факторного експерименту для створення математичних мо-

делей проводились у послідовності, представленій на рис. 1.

#### Умови використання повного факторного експерименту

Як модель, що описує поведінку сонячних батарей в умовах експлуатації, використаємо представлену на рис. 2 схему.

Розглянемо вимоги та умови використання повного факторного експерименту.

Вхідні фактори мають бути:

- сумісними, тобто їх можна використовувати у будь-якій комбінації;
- значною мірою незалежними, тобто між ними не має бути значного кореляційного зв'язку;
- кількісними, мати фізичну природу, придатними до вимірювання.

Планування експерименту передбачає вибір для кожного фактору верхнього (найбільше значення) та нижнього (найменше значення) рівнів, які визначають інтервал їх змінювання в експерименті [15]. Ці рівні призначаються дослідником.

Вибір інтервалу варіювання факторів, який кількісно відображається як різниця між верхнім (чи

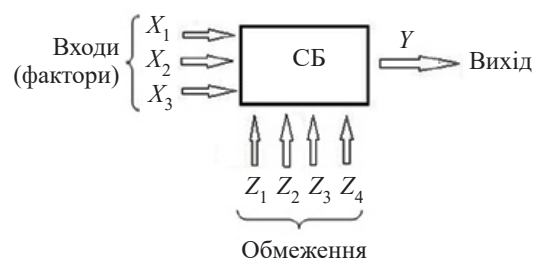


Рис. 2. Модель поведінки сонячних батарей в умовах експлуатації

нижнім) і основним рівнями, має супроводжуватися такими обмеженнями:

*обмеження знизу* — інтервал зміни має бути більше похибки виміру рівнів фактору;

*обмеження зверху* — рівні фактору мають лежати в межах області його визначення, тобто тих значень, які потім будуть використовуватись в реальних умовах експлуатації СБ.

*Основний рівень* — це значення фактору, яке відповідає середині між верхнім та нижнім рівнями.

В нашому випадку вхідними факторами будемо вважати такі:  $X_1$  — кут нахилу СБ до горизонту (кут місця);  $X_2$  — азимут розташування СБ (вибрано кут відносно напрямку на південь);  $X_3$  — певний час світлового дня, що характеризується положенням Сонця як за азимутом, так і за кутом місця, і яке залежить від широти розташування СБ та пори року. З безлічі обмежувальних факторів виділимо  $Z_1$  — ступінь хмарності;  $Z_2$  — ступінь забрудненості атмосфери;  $Z_3$  — ступінь забрудненості поверхні СБ;  $Z_4$  — тип СБ.

*Вихідний параметр*  $Y$ , тобто параметр оптимізації, має відповідати таким необхідним вимогам [15]:

— ефективність (найкращим чином забезпечується досягнення оптимального положення СБ);

— універсальність (забезпечується можливість оцінювання поведінки необмеженої кількості СБ, у тому числі різних типів);

— статистична однозначність (вбраному набору факторів  $X_1, X_2, X_3$  відповідає тільки одне значення параметра  $Y$  з точністю, яка визначається лише похибкою експерименту);

— має фізичний зміст;

— виражається кількісно одним числом, яке легко розраховується;

— існує при всіх можливих робочих станах СБ.

В нашому випадку вихідним параметром є потужність, якої досягає СБ при зазначених вхідних та обмежувальних факторах, і всі ці вимоги тою чи іншою мірою виконуються. При цьому, зважаючи на розв'язувану задачу, найкращим чином задовольняються вимоги універсальності та ефективності, а також умова щодо легкості розрахунку (за значеннями напруги та струму, що доступно вимірюються). Крім того, оскільки потужність СБ є техніко-економічним параметром, це дозволяє одночасно розглядати питання оптимізації як технічного, так і економічного характеру.

Дуже важливим для дослідження СБ є вибір математичної моделі для планування експерименту. Керуючись рекомендаціями [15], будемо використовувати поліноміальну модель. При цьому існує альтернатива вибору степені полінома для досягнення необхідної точності при мінімальній кількості коефіцієнтів рівняння, тобто вибору найбільш точної

та простої моделі. Надаючи перевагу точності, прийmemo таку математичну модель:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (1)$$

### Проведення експеримента та аналіз отриманих результатів

Для всебічного дослідження можливостей використання ПФЕ натурні випробування проводилися з такими значеннями факторів:

—  $X_1 = 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$  (для зручності сприйняття надалі позначатимемо його  $\alpha$ );

—  $X_2 = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$  (позначимо  $\beta$ );

—  $X_3 = 7.00; 7.45; 8.30; 9.00; 9.30; 10.30; 12.30$  год (позначимо  $t$ ).

Дослідження проводилися 09.07.2021 р. в умовах повністю безхмарного неба протягом всього часу експерименту на березі Чорного моря в м. Одеса (Україна). Використовувалась сонячна батарея АВ320-60МНС з максимальною потужністю 320 Вт.

В кожній точці, що відповідає певному значенню факторів  $X_1, X_2, X_3$ , вимірювалися напруга холостого ходу  $U_{xx}$  та струм короткого замикання  $I_{кз}$ . Для зручності подальшого використання ці параметри були приведені до одного параметру потужності [6]

$$P = 0,72U_{xx}I_{кз}. \quad (2)$$

План проведення експерименту представлено в **табл. 1**. Для отримання більшої точності моделі були використані складові, що враховують ефект взаємодії факторів:  $X_1X_2; X_1X_3; X_2X_3; X_1X_2X_3$ . Для зручності подальших розрахунків також введено фіктивний фактор  $X_0$ , який завжди знаходиться на верхньому рівні («+») і не змінює рівняння (1).

Таблиця 1

План проведення експерименту

$i$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y_i$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	50,6
2	+	+	-	-	-	-	+	+	12,8
3	+	-	+	-	-	+	-	+	59,1
4	+	+	+	-	+	-	-	-	129,7
5	+	-	-	+	+	-	-	+	250,9
6	+	+	-	+	-	+	-	-	116,2
7	+	-	+	+	-	-	+	-	244,8
8	+	+	+	+	+	+	+	+	99,4

Значення  $Y_i$  були розраховані за формулою (2) з використанням значень рівнів факторів (**табл. 2**), ці величини представляють собою потужність у ватах.

Таблиця 2

Значення рівнів факторів

Фактор	Рівень			Інтервал зміни
	верхній	нижній	основний	
$X_1, ^\circ$	90	15	52,5	37,5
$X_2, ^\circ$	90	0	45	45
$X_3, \text{год}$	12,5	7,0	9,75	2,75

Для визначення коефіцієнтів  $b_i$  в моделі (1) використовуємо залежність [15]

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z) Y_i, \quad (3)$$

де  $N$  — число дослідів;

$Y_i$  — значення параметра для всіх можливих сполучень рівнів факторів  $X_1, X_2, X_3$  (верхнього (+) чи нижнього (-)).

У цій формулі ( $z$ ) вказує на необхідність враховувати знаки факторів («+» чи «-») для всіх доданків кожної із сум  $N$ . Так, при розрахунку  $b_0$  всі складові суми мають знаки стовпця  $X_0$ ; при розрахунку  $b_1$  — знаки стовпця  $X_1$ , і так далі. Наприклад:

$$b_0 = \frac{1}{8} (50,6 + 12,8 + 59,1 + 129,7 + 250,9 + 116,2 + 244,8 + 99,4) = 120,4;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (-50,6 + 12,8 - 59,1 + 129,7 - 250,9 + 116,2 - 244,8 + 99,4) = -30,9.$$

Аналогічно отримаємо значення інших коефіцієнтів:

$$b_2 = 12,8; b_3 = 57,4; b_{12} = 12,2;$$

$$b_{13} = -39,1; b_{23} = -18,5;$$

$$b_{123} = -14,9.$$

В результаті використання простої нелінійної поліноміальної моделі (1) та розрахунку коефіцієнтів отримуємо нелінійне рівняння регресії

$$Y_{н1} = 120,4 - 30,9X_1 + 12,8X_2 + 57,4X_3 + 12,2X_{12} - 39,1X_{13} - 18,5X_{23} - 14,9X_{123}. \quad (4)$$

Тут нелінійна взаємодія двох та трьох факторів позначена простіше, ніж в моделі (1), наприклад замість  $X_1X_2$  використано  $X_{12}$ .

Модель перевірялась на адекватність через оцінку відхилення  $\delta$  розрахункових значень потужності  $P_{розр}$ , генерованої сонячною батареєю, від експериментальних значень  $P_{експ}$ :

$$\delta = |P_{експ} - P_{розр}| / P_{експ}. \quad (5)$$

Експериментальні значення потужності  $P_{експ}$ , як вказувалося раніше, були визначені в результаті натурних випробувань при вказаних значеннях факторів. Обчислення  $P_{розр}$  проводилося при тих самих значеннях факторів з використанням рівняння (4).

Для отримання дійсних значень потужності у вагах в рівнянні (4) фактори  $X_1, X_2, X_3$  замінюються на кодові значення, які розраховуються за формулою [15]

$$x_j = (\tilde{x}_j - x_{j0}) / I_j, \quad (6)$$

де  $\tilde{x}_j$  — натуральне значення фактору;

$x_{j0}$  — натуральне значення основного рівня;

$I_j$  — інтервал варіювання.

Розраховані кодові значення факторів наведено в **табл. 3**.

Розрахуємо для прикладу значення параметра при  $X_1 = 15^\circ, X_2 = 0^\circ, X_3 = 7.00$  год:

$$Y_{н1} = 120,4 - 30,9 \cdot (-1,0) + 12,8 \cdot (-1,0) + 57,4 \cdot 1,0 + 12,2 \cdot [(-1,0) \cdot (-1,0)] - 39,1 \cdot [(-1,0) \cdot (-1,0)] - 18,5 \cdot [(-1,0) \cdot (-1,0)] - 14,9 \cdot [(-1,0) \cdot (-1,0) \cdot (-1,0)] = 50,6.$$

Таблиця 3

Кодові значення факторів

Фактор $X_1$							
Натуральне значення, $^\circ$	15	30	45	60	75	90	—
Кодове значення	-1,0	-0,6	-0,2	0,2	0,6	1,0	—
Фактор $X_2$							
Натуральне значення, $^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
Кодове значення	-1,0	-0,67	-0,33	0	0,33	0,67	1,0
Фактор $X_3$							
Натуральне значення, год	7.00	7.45	8.30	9.00	9.30	10.30	12.30
Кодове значення	-1,0	-0,73	-0,45	-0,27	-0,09	0,27	1,0

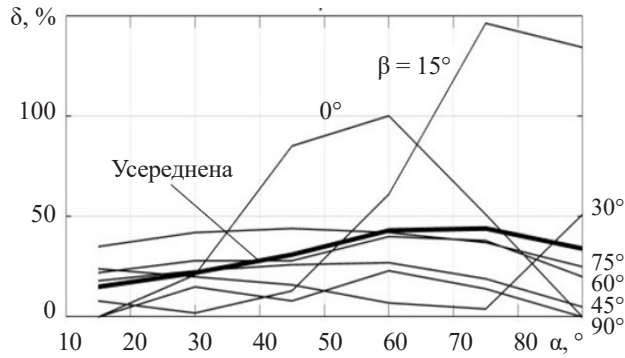


Рис. 3. Графіки залежності відхилення  $\delta$  від кута місця  $\alpha$  для різних положень СБ за азимутом ( $\beta$ ), отримані за моделлю регресії (4)

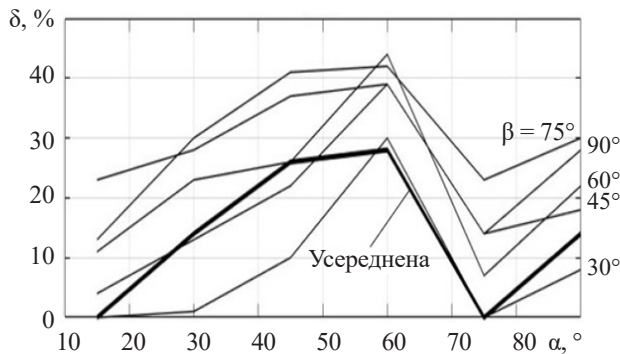


Рис. 4. Графіки залежності відхилення  $\delta$  від кута місця  $\alpha$  для різних положень СБ за азимутом ( $\beta$ ), отримані за уточненою моделлю регресії (8)

Результати перевірки моделі на адекватність представлено на **рис. 3** у вигляді залежностей відхилення  $\delta$  від кута місця для різних положень СБ за азимутом. На рисунку окремо наведено усереднену залежність, що може розглядатись як інтегральне оцінювання.

Ще більш інтегральною оцінкою може бути середнє відхилення для всіх значень  $\alpha$

$$\delta_{\text{інт}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot 100\%, \quad (7)$$

де  $n$  — кількість значень  $\alpha$ .

В нашому випадку отримали  $\delta_{\text{інт}} = 31,5\%$ .

Аналіз залежностей на **рис. 3** показує значні викиди даних для значень азимуту  $\beta = 0^\circ$  та  $\beta = 15^\circ$ . Щоб підвищити точність моделі, ці значення  $\beta$  були виключені, і було отримано нове рівняння регресії

$$Y_{\text{н2}} = 128,3 - 27,7X_1 + 5X_2 + 54,8X_3 + 10X_{12} - 37,3X_{13} - 16X_{23} - 16,7X_{123} \quad (8)$$

та проведено аналогічну перевірку моделі на адекватність, результати якої наведено на **рис. 4**. В цьому випадку було отримано  $\delta_{\text{інт}} = 20\%$ .

З метою отримання рівняння регресії, які б більш точно описували експериментальні дані, було зменшено кількість факторів з трьох до двох: був виключений фактор  $X_3$  — час світлового дня. Звичайно, це призводить до збільшення кількості рівнянь регресії

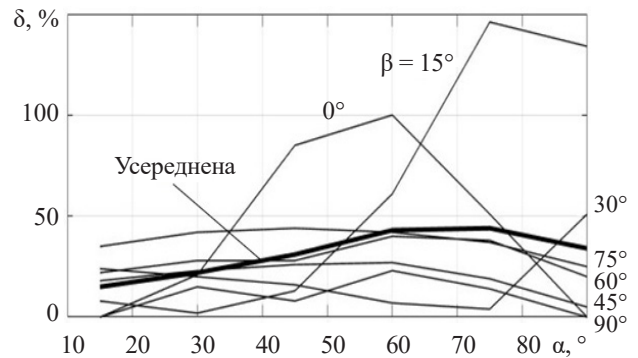


Рис. 5. Графіки залежності відхилення  $\delta$  від кута місця  $\alpha$  для різних положень СБ за азимутом ( $\beta$ ) для часу 7.00 год, отримані за моделлю регресії (9)

у разі необхідності визначення поведінки СБ протягом дня, але заради підвищення точності ця дія може бути виправданою.

Отримана в такому випадку модель регресії для часу 7.00 год виглядає так:

$$Y_{\text{н3}} = 63,1 + 8,2X_1 + 31,4X_2 + 27,1X_{12}. \quad (9)$$

Результати перевірки її на адекватність наведено на **рис. 5**. В цьому випадку було отримано  $\delta_{\text{інт}} = 31\%$ . Аналіз цих залежностей показує, що вони практично повторюють графіки на **рис. 3**. Крім того, дуже близькими є і значення  $\delta_{\text{інт}}$ .

### Висновки

Проведене дослідження продемонструвало, що у зв'язку зі значними похибками використання повного факторного експерименту в діапазоні значень факторів, що наближаються до всіх можливих, є доцільним лише для попереднього моделювання роботи сонячної батареї та приблизної оцінки результатів моделювання. Звуження діапазону значень факторів значно зменшує величину відхилень результатів моделювання від експериментальних даних, що в багатьох випадках може бути прийнятним, особливо якщо використовувати результати моделювання для конкретних умов використання сонячної батареї.

Зменшення кількості факторів, а саме виключення фактору часу, дозволяє значно спростити рівняння регресії, але не дає бажаних результатів щодо зменшення відхилень розрахункових параметрів від експериментальних.

Поясненням незадовільних результатів щодо точності моделей регресії при використанні повного факторного експерименту може бути існування складних залежностей параметра від факторів, що важко узагальнити в широкому діапазоні їх значень.

Очевидно, що для створення математичних моделей, які б з більшою точністю наближалися до дійсних, отримуваних експериментально даних, потрібно використовувати залежності для конкретизованих значень факторів.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Слипченко Н.И., Письменецкий В.А., Фролов А.В. и др. Экспериментальные исследования характеристик солнечной панели KV 150/24(12) в зимних условиях. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*, Харьков, 2011, №24, с. 86–92.
2. Kamanga B. et al. Optimum tilt angle for photovoltaic solar panels in Zomba district, Malawi. *Hindawi Publishing corporation journal of solar energy*, 2014, article ID 132950: <https://dx.doi.org/10.1155/2014/132950>.
3. Le Roux W. G. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data. *Renewable Energy*, 2016, vol. 96, p. 603–612. <https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.003>.
4. Lataa H. et al. The influence of photovoltaic panels on the amount of electric energy production for consumers, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, 214012032.
5. Степанов В.М., Горелов Ю. И., Пахомов С. Н. Анализ способов повышения эффективности функционирования солнечных батарей. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2018, вып.12, с. 17–23.
6. Саврасов Ф.В., Ковалев И.К. Исследования эффективности работы солнечной батареи в полевых условиях. *Известия Томского политехнического университета*, 2012, т. 321, №4, с. 165–168.
7. Нго Сян Кыонг. Повышение эффективности солнечных батарей с помощью следящей системы. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2013, вып. 1, с. 318–321.
8. Гульков В. Н., Колесниченко И. Д., Коротков К. Е. Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффектив-

ность преобразования излучения. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 2019, №1, с. 10–16.

9. Антонова Е. А., Горячев С. В. Повышение эффективности солнечных батарей нового поколения за счет использования новых материалов и их гибридизации. *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*, 2019, №1 (70), с. 7–11.
10. Deshmukh A. N., Chandrakar V. K. Design and performance analysis of grid-connected solar photovoltaic system with performance forecasting approach (PFA). *J. Inst. Eng. India Ser. B*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40031-022-00779-7>
11. Mardy Huot et al. Performance investigation of tempered glass-based monocrystalline and polycrystalline solar photovoltaic panels. *Hindawi International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, article ID 2335805. <https://doi.org/10.1155/2021/2335805>.
12. Єфіменко А. А., Логвінов О.В., Присяжнюк Л. І. Використання повного факторного експерименту для моделювання роботи сонячних батарей. *Труди 23-ї МНПК «CIET-2022»*. Україна, Одеса, 2022, с. 22–24.
13. Abel D., Reif E., Littman M. Improving solar panel efficiency using reinforcement learning. *Proceedings of the Multi-disciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RDLM)*, Ann Arbor (MI), 2017.
14. Nikitenko G.V. et al. Improving the energy efficiency of using solar panels. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020 613012092.
15. Яншин А.А. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА*, Москва, Радио и связь, 1983.

Дата надходження рукопису  
до редакції 01.08 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.32  
UDC 621.311.24

A. A. YEFIMENKO, O. V. LOGVINOV, L. I. PRISYAZHNIUK  
Ukraine, Odessa, Odessa Polytechnic National University  
E-mail: bogachevalyuba523@gmail.com

## USING FULL FACTORIAL EXPERIMENT TO SIMULATE ELECTRICITY GENERATION BY SOLAR BATTERIES

*The amount of electrical energy generated by solar batteries (SB) depends significantly on their position relative to the Sun. The presence of dependencies of the initial parameter of the SB on the factors determining this position allows finding the optimal orientation of fixed or partially fixed SBs.*

*This paper presents the results of the study on the conditions of using a full factorial experiment for creating mathematical models — regression equations — to simulate the operation of solar batteries under the condition of reducing the amount of field tests necessary for this. It is shown that the simulation accuracy significantly depends on the range of factor values.*

*The conducted study demonstrates that the use of a full factorial experiment in the range of factor values approaching all possible is appropriate for preliminary simulation of the solar battery operation and an approximate assessment of the simulation results in connection with significant errors. Narrowing the range of factor values significantly reduces the deviations of simulation results from experimental data, which in many cases can be accepted, especially if the simulation results are used for specific operating conditions of the solar cell. In order to create mathematical models that would more accurately approach the actual ones obtained experimentally, it is necessary to use dependencies for concretized values of factors.*

*Keywords: solar cell, modeling, full factorial experiment, regression equation.*

## REFERENCES

1. Slipchenko N.Y., Pysmenetskyi V.A., Frolov A.V. et al. [Experimental studies of the characteristics of the solar panel KV 150/24(12) in winter conditions]. *Vestnik Nats. tekhn. universiteta «KHPI»*, Kharkiv, 2011, no. 24, pp. 86–92. (Rus.)
2. Kamanga B. et al. Optimum tilt angle for photovoltaic solar panels in Zomba district, Malawi. *Hindawi Publishing corporation journal of solar energy*, 2014, article ID 132950: <https://dx.doi.org/10.1155/2014/132950>.

3. Le Roux W. G. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data. *Renewable Energy*, 2016, vol. 96, pp. 603–612. <https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.003>.
4. Lataa H. et al. The influence of photovoltaic panels on the amount of electric energy production for consumers, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, 214012032.
5. Stepanov V. M., Gorelov Yu. I., Pakhomov S. N. [Analysis of ways to improve the efficiency of the functioning of solar bat-

teries]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2018, iss. 12, pp. 17–23. (Rus.)

6. Savrasov F. V., Kovalev I. K. [Studies of the efficiency of the solar battery in the field]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 165–168. (Rus.)

7. Ngo Hsiang Kyong. Increasing the efficiency of solar batteries with the help of a tracking system. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2013, vol. 1, pp. 318–321. (Rus.)

8. Gul'kov V. N., Kolesnichenko I. D., Korotkov K. Ye. [Investigation of the effect of heating solar modules on the efficiency of radiation conversion]. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2019, no. 1, pp. 10–16. (Rus.)

9. Antonova E. A., Goryachev S. V. [Improving the efficiency of solar batteries of a new generation through the use of new materials and their hybridization]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta*, 2019, no. 1 (70), pp. 7–11. (Rus.)

10. Deshmukh A. N., Chandrakar V. K. Design and performance analysis of grid-connected solar photovoltaic system with performance forecasting approach (PFA). *J. Inst. Eng. India Ser. B*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40031-022-00779-7>

11. Mardy Huot et al. Performance investigation of tempered glass-based monocrystalline and polycrystalline solar photovoltaic panels. *Hindawi International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, article ID 2335805. <https://doi.org/10.1155/2021/2335805>.

12. Yefimenko A. A., Logvinov O. V., Prisyazhniuk L. I. [Use of a full factorial experiment for modeling the operation of solar batteries]. *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odesa, 2022, p. 22–24. (Ukr)

13. Abel D., Reif E., Littman M. Improving solar panel efficiency using reinforcement learning. *Proceedings of the Multi-disciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RDLM)*, Ann Arbor (MI), 2017.

14. Nikitenko G.V. et al. Improving the energy efficiency of using solar panels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020 613012092.

15. Yanshyn A. A. *Teoreticheskiye osnovy konstruirovaniya, tekhnologii i nadezhnosti EVA* [Theoretical foundations of construction, technology and reliability of EVA]. Moscow, Radio i svyaz', 1983. (Rus)

**Опис статті для цитування:**

Єфіменко А. А., Логвінов О. В., Присяжнюк Л. І. Використання повного факторного експерименту для моделювання генерації електроенергії сонячними батареями. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 4–6, с. 32–38. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.32>

**Cite the article as:**

Yefimenko A. A., Logvinov O. V., Prisyazhniuk L. I. Using full factorial experiment to simulate electricity generation by solar batteries. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 32–38. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.32>

**НОВІ КНИГИ**

**НОВІ КНИГИ**

**Василів К. М. Експлуатація електричних станцій.— Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2022.**

Систематизовано та викладено базовий матеріал теоретичних засад та практики технологій експлуатації теплових та частково атомних електричних станцій. Описано проблеми нагріву, перевантаження та випробування ізоляції електротехнічного обладнання електростанцій на базі аналізу фізики відповідних процесів. Детально розглянуто питання нагляду, догляду та ремонту турбогенераторів і електричних двигунів власних потреб електростанцій. Проаналізовано питання електричних схем і забезпечення надійності електроживлення власних потреб 6 та 0,4 кВ. Викладено теоретичну концепцію математичного моделювання в практиці експлуатації теплових та атомних електричних станцій.

Для студентів спеціальності “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”.

