

<https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-318-3-12>

УДК 620.91

Тетяна ГІЛЬОРМЕ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

<https://orcid.org/0000-0002-9598-6532>

e-mail: gillyorme@i.ua

Лілія НАКАШИДЗЕ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

<https://orcid.org/0000-0003-3990-6718>

e-mail: foton_dnu@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Актуальною науково-практичною проблемою сталого розвитку енергетики країни є прогнозування параметрів та передбачення умов функціонування сонячних елементів та сонячних батарей в штатних та позаштатних ситуаціях. Акцентовано, що це дозволяє забезпечити сонячної енергетики високі показники ефективності, зокрема показник прибутковості на інвестований капітал у побудову сонячних батарей. Основним специфічним методом дослідження є регресійний аналіз для побудови моделі прогнозу загальної кількості генерованої енергії сонячних батарей у наземних установках за умов експлуатації в змінних умовах. Здійснено аналіз розподілу вихідних даних моделі за кількістю модулів сонячних батарей на прикладі наземних сонячних установок. Для отримання емпіричних даних обрано 31 об'єкт у Дніпропетровській та Запорізькій областях, що мають функціонуючі сонячні батареї з різною кількістю модулів. Це надає можливість розрахувати середньозважену кількість генерованої енергії при експлуатації в змінних умовах. Визначено, що фактор впливу моделі «кількість модулів сонячних батарей» має позитивний вплив на результативний фактор (продуктивність сонячних батарей). Тоді як фактор впливу «середньозважена кількість генерованої енергії». Однак більш значущим є фактор впливу «кількість модулів сонячних батарей». Отримані результати дають підстави стверджувати щодо можливості втілення їх у енергетичний сектор.

Ключові слова: сонячна батарея, генерована енергія, гаряча пляма, надійність, термін експлуатації, технічна безпека.

Tetiana HILORME, Liliya NAKASHYDZE

Oles Honchar Dnipro National University

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF THE SOLAR CELLS DESIGN ON THEIR FUNCTIONING EFFICIENCY

An essential scientific and practical problem of sustainable development of the country's energy sector is predicting the parameters and foreseeing the conditions of functioning of solar cells and solar elements in normal and emergency situations. It is emphasized that this allows to provide solar energy with high efficiency indicators, including return on invested capital in the solar panels construction. The main specific research method used is regression analysis aimed at building a model for predicting the total amount of generated energy from solar cells in ground-based installations under variable conditions. The distribution of the model output data by the number of solar cell modules is analyzed on the example of ground-mounted solar installations. To obtain empirical data, we selected 31 facilities in the Dnipro and Zaporizhzhia regions that use solar cells with different numbers of modules. This allows to calculate the weighted average amount of energy generated during operation in variable conditions. We distinguished 10 intervals of frequency values, with the largest range of values being in the range of 10000-20000 solar cell modules. The regression coefficients were checked by two criteria. According to the criterion of "t-statistics value": the coefficients are significant at a significance level of 0.05. The criterion of asymptotic significance determines the rejection of the null hypothesis in a statistical test. The random value is 170.3694, which is significantly higher than the critical value of the F-statistic of 3.33. A model of the dependence of the total amount of generated energy on the number of solar modules and the weighted average amount of generated energy was built on the basis of regression analysis. It is determined that the model influence factor "number of solar modules" has a positive effect on the resultant factor (solar cell productivity). Whereas the influence factor is "weighted average amount of generated energy". However, the influence factor "number of solar modules" is more significant. The obtained results allow us to assert the possibility of their implementation in the energy sector.

Key words: solar cell, generated energy, reliability, service life, technical safety.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Прогнозування параметрів та передбачення умов функціонування сонячних елементів (СЕ) та сонячних батарей (СБ) – одна з основних задач при формуванні систем енергозабезпечення, у якості основного енергоресурсу використовуються енергія сонячного випромінювання.

При експлуатації в мовах наземного функціонування на продуктивність та ефективність функціонування сонячних елементів та сонячних батарей впливають ціла низка природних факторів. Серед основних можна відокремити такі: погодні та кліматичні умови: дощ, сніг, град, хмарність, туман, спека, холод; зміна дня та ночі; нерівномірність освітлення: локальні забруднення; зростання температури; забруднення: пил, сніг; незворотні втрати тощо. Якщо сукупність цих факторів відповідає нормальним умовам функціонування СБ, це штатна робоча ситуація. Є відхилення від норми – це позаштатна ситуація.

Вартість СБ відносно постійно знижується і сонячна енергетика має високі показники середньозваженої вартості генерованої електроенергії (LCOE). Цей показник відображає фіксований тариф на електроенергію, що відображає собівартість її генерації і при якому сукупна дисконтована виручка від продажу електроенергії кінцевому споживачу дорівнює сукупним дисконтованим витратам упродовж всього життєвого циклу енергогенеруючого об'єкта. Це мінімальна ціна, за якою електроенергія, згенерована за весь термін служби електростанції, повинна бути реалізована для досягнення її точки беззбитковості ($NPV = 0$). Якщо ціна на електроенергію буде вищою за LCOE, це дасть більший, ніж прийнята ставка дисконтування, показник прибутковості на інвестований капітал ($NPV > 0$), у той час як менша ціна не дозволить проекту окупитися із заданою ставкою дисконтування ($NPV < 0$).

Отже, потребує поглибленого аналізу та методичного уточнення комплекс питань, пов'язаних з визначенням специфіки запровадження проектних рішень побудови СБ. Компаніям енергетичної галузі дедалі складніше стає визначати набір показників ефективності інструментів проектних рішень, необхідний для створення довготривалих взаємовідносин на ринку та досягнення задоволення потреб споживача.

Таким чином, подальший розвиток основ проектування ефективних сонячних батарей має важливе наукове та практичне значення. Для розвитку енергетичної галузі в світі це є актуальним науково-практичним питанням, що потребує подальшого доопрацювання та розв'язання.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботах [1–3] розглянуто особливості функціонування сонячних батарей при похмурій погоді. Окреслено, що найвищої ефективності від них можна досягти в сонячну погоду за температури нагрівання фотоелектричних елементів не більше $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Коли небо затягнене хмарами, ефективність функціонування та продуктивність СБ значно знижується, але генерування не припиняється. У саму похмуру погоду вихідна потужність складає всього 5–20 % максимально можливої [2]. Це зумовлено тим, що хмари закривають доступ сонячних променів до панелей, залишаючи лише розсіяне світло. Акцентовано, що використання поворотного механізму для СБ є ефективними в похмуру погоду [3]. Насправді, навіть за відсутності сонячних променів, поворот фотоелектричних елементів у бік сонця, прихованого хмарами, має значення. Це пов'язано з тим, що навіть розсіяне світло має вищу інсоляцію. А тому, для підвищення ефективності сонячної електростанції в похмуру погоду, рекомендується встановлення панелей, що повертаються за рухом сонця. Але в цих роботах не чітко окреслено рівень впливу цих факторів, та похибка, яку необхідно враховувати при проектуванні таких установок.

В роботах [4–6] проаналізовано наявність впливу на ефективність функціонування локальних забруднень поверхні СБ. Якщо сонячний елемент, що входить до складу СБ, освітлений менш інтенсивно, ніж сусідній, то він стає паразитним навантаженням і знижує загальну енерговіддачу [4]. Якщо частина панелей буде в тіні, це негативно вплине на вироблення всіх модулів, навіть тих, що знаходяться під Сонцем. Вони частково функціонують, але лише частково від реального потенціалу [5]. Від цього не лише зменшується ефективність, а й страждають самі панелі: нагріваються кремнієві осередки, збільшується знос струмоведучих частин [6]. Якщо в такому режимі сонячні електростанції (СЕС) пропрацює кілька діб – незначне зменшення продуктивності, однак при регулярній частковій затіненості – зменшується базовий ККД за рахунок послаблення контактів між елементами, і, як наслідок, відбувається відмова певних зон СБ.

Часткове затінення впливає на продуктивність та надійність тонкоплівкових та кристалічних кремнієвих СБ. В роботі [7] зауважено: експерименти показують, що сонячні панелі на основі тонкоплівкових технологій та СБ на основі кристалічних кремнієвих СЕ поведуться по-різному за однакових схем затінення. Але в роботі не визначено негативні граничні фізико-технічні параметри впливу рівня затіненості СБ.

Зміна конструктивних технічних рішень побудови СБ може призвести до зміни енергогенеруючої здатності установки. При цьому необхідно прогнозувати та передбачити зміни технологічних параметрів.

Усе це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого обґрунтуванню визначення впливу кількісного складу конструктиву на продуктивність сонячних батарей із застосуванням сучасного наукового інструментарію.

Формулювання цілей статті

Мета роботи полягає у формуванні розрахункового методу визначення впливу конструктивних особливостей побудови сонячних батарей на продуктивність за різних змінних умов експлуатації. Це дасть можливість збільшити ефективність СБ у розрізі її продуктивності та збільшити резерви генерації енергії.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- здійснити аналіз розподілу вихідних даних моделі за кількістю модулів СБ на прикладі наземних сонячних установок;
- визначити регресійну модель залежності загального рівня генерованої енергії від кількості модулів СБ та середньозваженої кількості генерованої енергії.

Виклад основного матеріалу

Вихідними даними для побудови залежності загальної кількості генерованої енергії від кількості модулів СБ та середньозваженої кількості генерованої енергії було обрано 31 об'єкт у Дніпропетровській та Запорізькій областях. Вони мають функціонуючі СБ з різною кількістю модулів та можливість розрахувати середньозважену кількість генерованої енергії. Були використанні такі припущення: фактичний термін експлуатації СБ складає 15–20 років; кількість модулів приблизно однакова у конструктиву; середній рівень інсоляції тощо.

Задачу вибору кількості інтервалів групування емпіричних даних для їх статистичної обробки можна сформулювати як задачу оптимальної фільтрації випадкових відхилень гістограми розподілу емпіричної вибірки від гладкої кривої щільності розподілу генеральної сукупності. Як правило, використовують інтервали рівної ширини або рівної ймовірності [8–10]. Можна довести, що існує оптимальна для даної вибірки кількість інтервалів певного типу.

Суб'єктивним критерієм правильності обрання кількості класів є точність відображення характеру розподілу емпіричних (фактичних частот) частот досліджуваної сукупності. Це дозволяє здійснити проведення аналізу розподілу вихідних даних моделі за кількістю модулів СБ на прикладі наземних сонячних установок (табл. 1).

Таблиця 1

Розподіл вихідних даних моделі в інтервалах частот

| № з/п | Інтервал значень, шт. | | | Кількість об'єктів | Частка | | Частка накопичена | |
|--------|-----------------------------|----------------------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | від (включено до діапазону) | до (виключено з діапазону) | від – до | | Фактичний розподіл | Нормальний розподіл | Фактичний розподіл | Нормальний розподіл |
| 1 | 0 | 100 | 0–100 | 0 | 0.0% | 0.2% | 0.0% | 0.2% |
| 2 | 100 | 200 | 100–200 | 0 | 0.0% | 0.2% | 0.0% | 0.5% |
| 3 | 200 | 500 | 200–500 | 0 | 0.0% | 0.7% | 0.0% | 1.2% |
| 4 | 500 | 1000 | 500–1000 | 0 | 0.0% | 1.3% | 0.0% | 2.5% |
| 5 | 1000 | 2000 | 1000–2000 | 0 | 0.0% | 2.7% | 0.0% | 5.1% |
| 6 | 2000 | 5000 | 2000–5000 | 2 | 6.5% | 9.1% | 6.5% | 14.2% |
| 7 | 5000 | 10000 | 5000–10000 | 5 | 16.1% | 17.6% | 22.6% | 31.8% |
| 8 | 10000 | 20000 | 10000–20000 | 13 | 41.9% | 32.2% | 64.5% | 64.0% |
| 9 | 20000 | 50000 | 20000–50000 | 10 | 32.3% | 18.4% | 96.8% | 82.4% |
| 10 | 50000 | 100000 | 50000–100000 | 1 | 3.2% | 0.0% | 100.0% | 82.4% |
| Всього | X | X | X | 31 | 100 % | 82 % | – | – |

Джерело: авторські розрахунки

За результатом аналізу розподілу даних моделі в інтервалах частот (табл. 1) можна зробити такі висновки. Відокремлено 10 інтервалів значень, при цьому кількість об'єктів відповідає таким діапазнам: 0–100 – 0 об'єктів; 100–200 – 0 об'єктів; 200–500 – 0 об'єктів; 500–1000 – 0 об'єктів; 1000–2000 – 0 об'єктів; 2000–5000 – 2 об'єктів; 5000–10000 – 5 об'єктів; 10000–20000 – 13 об'єктів; 20000–50000 – 10 об'єктів; 50000–100000 – 1 об'єкт. Значення частки фактичного розподілу загальної моделі виборці складає 100 %, тоді як частка нормального розподілу загальної моделі виборці – 82 %. Як видно, вихідна сукупність із 31 СБ розбита на 5 інтервалів. У кожному інтервалі розраховано: частота, накопичена частота, відсоток від загальної частоти, накопичений відсоток від загальної частоти, відсоток від загального числа спостережень, накопичений відсоток від загального числа спостережень, теоретична частота, накопичена теоретична частота.

Для неперервних розподілів графік абсолютних частот доцільно зображувати як стовпчикову діаграму, а для дискретних – як гістограму, точковий або лінійчатий графік.

На рис. 1 показана гістограма розподілу вихідних даних моделі в інтервалах частот.

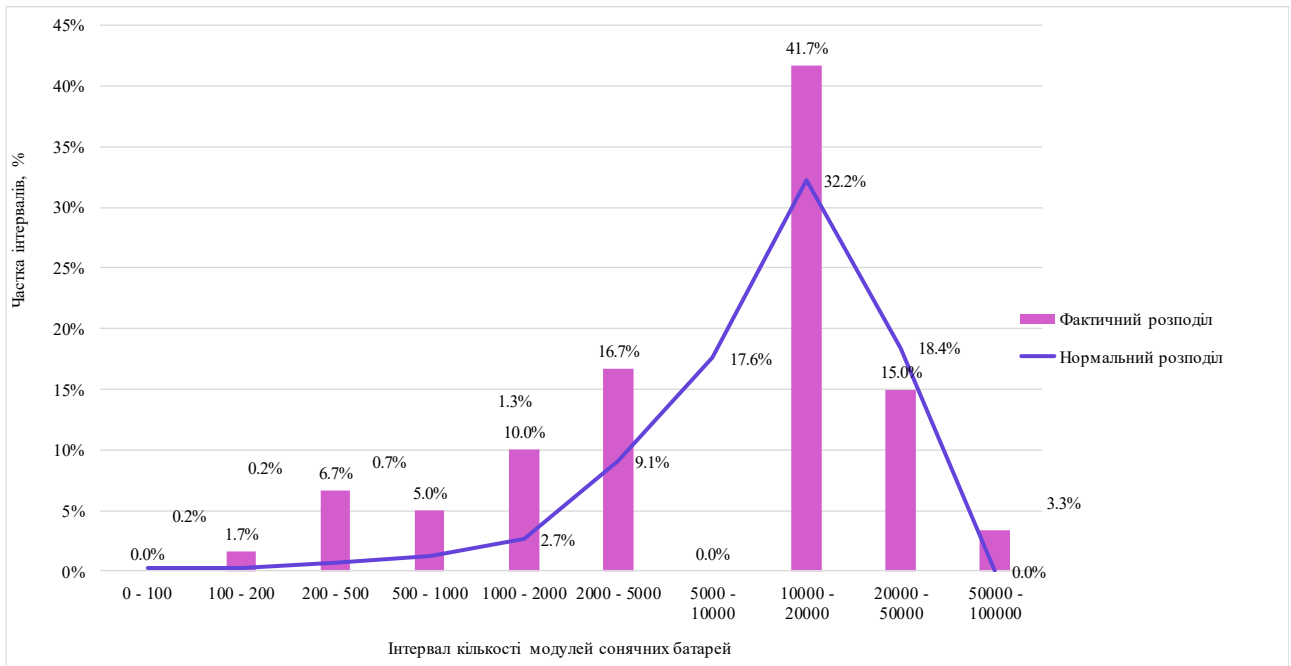


Рис. 1. Гістограма розподілу вихідних даних моделі в інтервалах частот

Джерело: розроблено авторками

Ряд вихідних даних із кількості модулів СБ має нормальний розподіл, скошений вліво. Після логарифмування інтервалів значень дані набули вигляду нормального розподілу, придатного для подальшої статистичної обробки та моделювання. Для підтвердження цього твердження побудовано накопичення частот вихідних даних моделі (рис. 2).

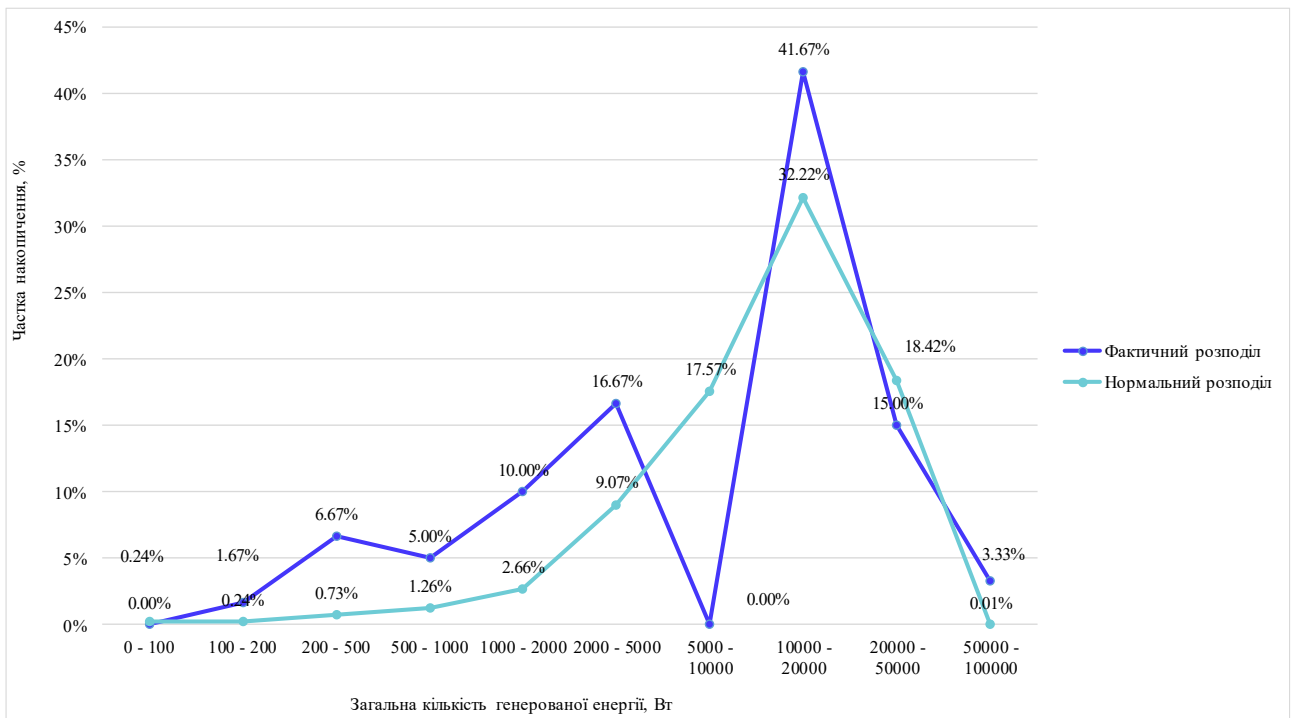


Рис. 2. Накопичення частот вихідних даних моделі

Джерело: розроблено авторками

Наведене на рис. 2 порівняння фактичних (емпіричних) і теоретичних частот та накопичених емпіричних й теоретичних частот, дозволяють зробити висновки про відповідність нормальному закону розподілу та визначити розбіжність частот у кожному з досліджуваних інтервалів.

При побудові регресійної моделі залежності загальної кількості генерованої енергії від кількості модулів СБ та середньозваженої кількості генерованої енергії визначено вихідні дані (табл. 2). У зв'язку з тим, що кількість спостережень складає 31, у табл. 2 представлено фрагмент вихідних даних моделі.

Таблиця 2

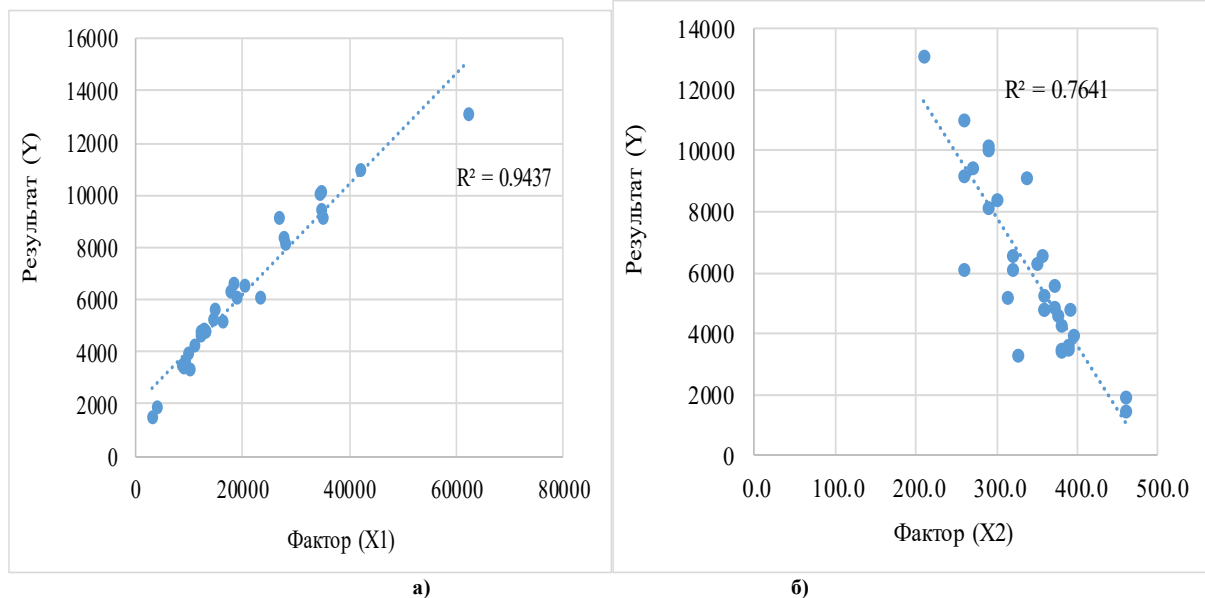
Вихідні дані регресійної моделі залежності загальної кількості генерованої енергії від кількості модулів СБ та середньозваженої кількості генерованої енергії

| № з/п | Кількість модулів СБ, шт. (X1) | Середньозважена кількість генерованої енергії з модулів СБ, Вт/шт. (X2) | Загальна кількість генерованої енергії, Вт (Y) |
|-------|--------------------------------|---|--|
| 1 | 42 300 | 260 | 10998000 |
| 2 | 27 911 | 300 | 8373300 |
| 3 | 20 427 | 320 | 6536640 |
| 4 | 35 000 | 290 | 10150000 |
| 5 | 17 962 | 350 | 6286700 |
| 6 | 13 321 | 360 | 4795560 |
| 7 | 13 000 | 373 | 4849000 |
| 8 | 62 300 | 210 | 13083000 |
| 9 | 16 465 | 314 | 5170010 |
| 10 | 15 000 | 373 | 5595000 |
| 11 | 19 021 | 320 | 6086720 |
| 12 | 12 228 | 377 | 4609956 |
| 13 | 18 459 | 357 | 6589863 |
| 14 | 9 000 | 380 | 3420000 |
| 15 | 10 121 | 326 | 3299446 |
| 16 | 13 236 | 360 | 4764960 |
| 17 | 8 900 | 390 | 3471000 |
| 18 | 23 354 | 260 | 6072040 |
| 19 | 9 293 | 390 | 3624270 |
| 20 | 10 000 | 395 | 3950000 |
| 21 | 12 180 | 391 | 4762380 |
| 22 | 14 655 | 360 | 5275800 |
| 23 | 27 000 | 338 | 9126000 |
| 24 | 11 200 | 380 | 4256000 |
| 25 | 9 200 | 380 | 3496000 |
| 26 | 28 000 | 290 | 8120000 |
| 27 | 35 000 | 270 | 9450000 |
| 28 | 34 624 | 290 | 10040960 |
| 29 | 4 100 | 460 | 1886000 |
| 30 | 35 200 | 260 | 9152000 |
| 31 | 3 200 | 460 | 1472000 |

Джерело: авторські розрахунки

Охарактеризуємо модель. Тип моделі – двофакторна лінійна регресія. Два фактора X1 (кількість модулів СБ) та X2 (середньозважена кількість генерованої енергії з модулів СБ), результативна ознака у (загальна кількість генерованої енергії).

Побудуємо часткові корелограми двох факторів впливу на результативну ознаку (рис. 3).



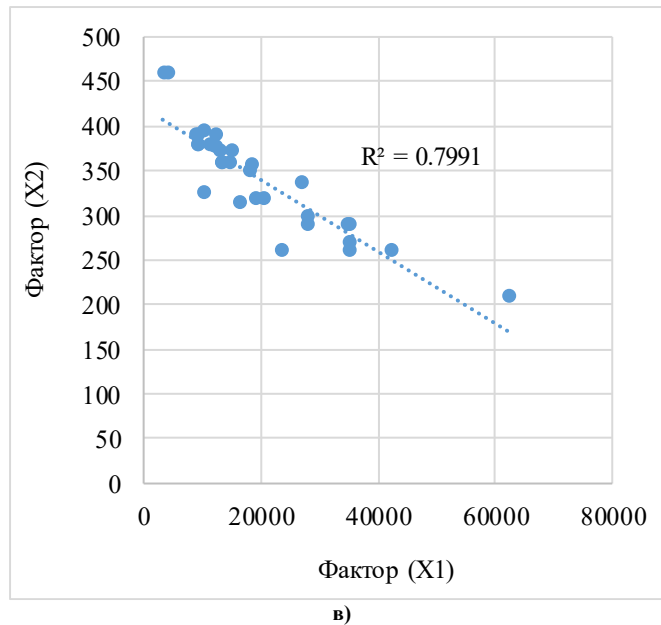


Рис. 3. Часткові корелограми (матричні діаграми розсіювання): а – $Y(X1)$; б – $Y(X2)$; в – $X1(X2)$

Джерело: розроблено авторками

Необхідно знати, що при лінійній формі зв'язку абсолютна величина лінійного коефіцієнта кореляції дорівнює індексу кореляції, тобто $|r| = R$. Відповідно до оцінки щільності зв'язку на основі лінійного коефіцієнта кореляції можна зробити такий висновок. Всі три часткові корелограми мають щільний зв'язок – лінійний коефіцієнт кореляції більше 0,7 відповідно до шкали Чедока має ранг «щільний» зв'язок. Рис. 3а – пряма залежність, рис. 3б та 3в – обернена залежність. Стає очевидним, що розкид точок щодо площини регресії зовсім не великий і тому, швидше за все, побудована модель є корисною, а вибрані 2 змінні X дозволяють прогнозувати Y .

Коефіцієнти регресії розраховані на основі даних табл. 2 за допомогою пакету MS Excel. Функція ЛІНЕЙН() розраховує статистику для ряду із застосуванням методу найменших квадратів, обчислюючи пряму лінію, яка найкраще апроксимує наявні дані.

Розрахунки здійснимо у такої послідовності.

1. Знайти рівняння лінійної множинної регресії в стандартизовану та природній формі.
2. Знайти коефіцієнти множинної та часткової кореляції, множинної детермінації; дати їх характеристику.
3. Розрахувати загальний та частковий F -критерії Фішера; оцінити статистичну надійність рівняння регресії та коефіцієнта множинної детермінації; оцінити доцільність включення до рівняння множинної регресії фактора $X1$ після фактора $X2$ та доцільність включення фактора $X2$ після фактора $X1$.
4. За потреби визначити рівняння парної регресії (виключивши статистично незначущий чинник). Складемо розрахункову таблицю (табл. 3).

Таблиця 3

Розрахункова таблиця регресійної моделі залежності загальної кількості генерованої енергії від кількості модулів СБ та середньозваженої кількості генерованої енергії

| № з/п | $Y(X1)$ | $Y(X2)$ | $X1(X2)$ | Y^2 | $X1^2$ | $X2^2$ |
|-------|-------------|------------|----------|-------------|------------|--------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 4.65215E+11 | 2859480000 | 10998000 | 1.20956E+14 | 1789290000 | 67600 |
| 2 | 2.33707E+11 | 2511990000 | 8373300 | 7.01122E+13 | 779023921 | 90000 |
| 3 | 1.33524E+11 | 2091724800 | 6536640 | 4.27277E+13 | 417262329 | 102400 |
| 4 | 3.5525E+11 | 2943500000 | 10150000 | 1.03023E+14 | 1225000000 | 84100 |
| 5 | 1.12922E+11 | 2200345000 | 6286700 | 3.95226E+13 | 322633444 | 122500 |
| 6 | 63881654760 | 1726401600 | 4795560 | 2.29974E+13 | 177449041 | 129600 |
| 7 | 63037000000 | 1808677000 | 4849000 | 2.35128E+13 | 169000000 | 139129 |
| 8 | 8.15071E+11 | 2747430000 | 13083000 | 1.71165E+14 | 3881290000 | 44100 |
| 9 | 85124214650 | 1623383140 | 5170010 | 2.6729E+13 | 271096225 | 98596 |
| 10 | 83925000000 | 2086935000 | 5595000 | 3.1304E+13 | 225000000 | 139129 |
| 11 | 1.15776E+11 | 1947750400 | 6086720 | 3.70482E+13 | 361798441 | 102400 |
| 12 | 56370541968 | 1737953412 | 4609956 | 2.12517E+13 | 149523984 | 142129 |
| 13 | 1.21642E+11 | 2352581091 | 6589863 | 4.34263E+13 | 340734681 | 127449 |
| 14 | 30780000000 | 1299600000 | 3420000 | 1.16964E+13 | 81000000 | 144400 |
| 15 | 33393692966 | 1075619396 | 3299446 | 1.08863E+13 | 102434641 | 106276 |
| 16 | 63069010560 | 1715385600 | 4764960 | 2.27048E+13 | 175191696 | 129600 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|-------------|------------|----------|-------------|------------|----------|
| 17 | 30891900000 | 1353690000 | 3471000 | 1.20478E+13 | 79210000 | 152100 |
| 18 | 1.41806E+11 | 1578730400 | 6072040 | 3.68697E+13 | 545409316 | 67600 |
| 19 | 33680341110 | 1413465300 | 3624270 | 1.31353E+13 | 86359849 | 152100 |
| 20 | 39500000000 | 1560250000 | 3950000 | 1.56025E+13 | 100000000 | 156025 |
| 21 | 58005788400 | 1862090580 | 4762380 | 2.26803E+13 | 148352400 | 152881 |
| 22 | 77316849000 | 1899288000 | 5275800 | 2.78341E+13 | 214769025 | 129600 |
| 23 | 2.46402E+11 | 3084588000 | 9126000 | 8.32839E+13 | 729000000 | 114244 |
| 24 | 47667200000 | 1617280000 | 4256000 | 1.81135E+13 | 125440000 | 144400 |
| 25 | 32163200000 | 1328480000 | 3496000 | 1.2222E+13 | 84640000 | 144400 |
| 26 | 2.2736E+11 | 2354800000 | 8120000 | 6.59344E+13 | 784000000 | 84100 |
| 27 | 3.3075E+11 | 2551500000 | 9450000 | 8.93025E+13 | 1225000000 | 72900 |
| 28 | 3.47658E+11 | 2911878400 | 10040960 | 1.00821E+14 | 1198821376 | 84100 |
| 29 | 77326000000 | 867560000 | 1886000 | 3.557E+12 | 16810000 | 211600 |
| 30 | 3.2215E+11 | 2379520000 | 9152000 | 8.37591E+13 | 1239040000 | 67600 |
| 31 | 47104000000 | 677120000 | 1472000 | 2.16678E+12 | 10240000 | 211600 |
| Сума | 4.78048E+12 | 6.0169E+10 | 1.89E+08 | 1.38639E+15 | 1.7055E+10 | 3714658 |
| Середнє | 1.54209E+11 | 1940935391 | 6089116 | 4.47223E+13 | 550155496 | 119827.7 |

Джерело: авторські розрахунки

Знайдемо середні квадратичні відхилення змінних:

$$U_{X1} = \text{КОРІНЬ}((4,4722E+13) - 6089116^2) = 2764959.758$$

$$U_{X2} = \text{КОРІНЬ}(550155496 - 19730,87^2) = 12682.59542$$

$$U_{X3} = \text{КОРІНЬ}(119827,7 - 341,4194^2) = 57.1008$$

Знайдемо коефіцієнти парної кореляції:

$$R_{Y(X1)} = ((154209E+11) - 6089116 \times 19730,87) / (2764959.758 \times 12682.59542) = 0.97145$$

$$R_{Y(X2)} = ((1.941E+09) - 6089116 \times 341,419) / (2764959.758 \times 57.1008) = -0.87412$$

$$R_{X1(X2)} = (6089116 - 19730,87 \times 341,419) / (12682.59542 \times 57.1008) = -0.89395$$

Стандартизовані В-коефіцієнти визначимо:

$$B_1 = (0.97145 - (-0.87412) \times (-0.89395)) / (1 - (-0.89395)^2) = 0.94610$$

$$B_2 = ((-0.87412) - (0.97145 \times (-0.89395))) / (1 - (-0.89395)^2) = -0.006$$

Таким чином, рівняння регресії у стандартизованій формі має вигляд: $y = 0.9461X1 - 0.06X2$.

Порівняння модулів стандартизованих значень коефіцієнтів регресії ($|B_1| = 0.94610 > |B_2| = 0.006$) свідчить про те, що на загальну кількість генерованої енергії більш впливає кількість модулів СБ (фактор $X1$), ніж фактор $X2$.

Розрахуємо природні коефіцієнти регресії:

$$b_1 = 0.94610 / (2764959.758 \times 12682.59542) = 206.2619$$

$$b_2 = -0.006 / (2764959.758 \times 57.1008) = -275.7292$$

$$a = 6089116 - 206.2619 \times 19730,87 - (-275.7292) \times 341,419 = 2113528.1508$$

На основі прямого розрахунку коефіцієнтів регресії визначено аналітичний вигляд моделі, при цьому розділимо рівняння на 1000 (переведемо у кВт):

$$Y = 2113.528 + 0.2063X1 - 0.2757X2, \quad (1)$$

Зі збільшенням загальної кількості генерованої енергії більш на 1 кВт кількість модулів СБ збільшується в середньому на 0,2063 кВт, а зі збільшенням Y на 1 кВт середньозважена кількість генерованої енергії зменшується в середньому на 0,2757 кВт.

Коефіцієнт множинної кореляції знаходиться:

$$R_{YX1X2} = \text{КОРІНЬ}(0.94610 \times 0.97145 - (-0.006) \times (-0.87412)) = 0.9613$$

Знайдемо коефіцієнт множинної детермінації:

$$R^2_{YX1X2} = (\text{КОРІНЬ}(0.9613))^2 = 0.9241$$

Величина коефіцієнта множинної кореляції показує, що зв'язок між Y , $X1$, $X2$ – високий, причому 92,41% варіації загальної кількості генерованої енергії пояснюється варіацією кількості модулів СБ та середньозваженої кількості генерованої енергії.

Коефіцієнти часткової кореляції визначаються через парні коефіцієнти кореляції:

$$R_{YX1 \cdot X2} = (0.97145 - (-0.87412) \times (-0.89395)) / \text{КОРІНЬ}((1 - (-0.87412)^2) \times (1 - (-0.89395)^2)) = 0.872969934$$

$$R_{YX2 \cdot X1} = ((-0.87412) - 0.97145 \times (-0.89395)) / \text{КОРІНЬ}((1 - 0.97145^2) \times (1 - (-0.89395)^2)) = -0.053551035$$

$$R_{X1 \cdot X2 \cdot Y} = ((-0.89395) - 0.97145 \times (-0.87412)) / \text{КОРІНЬ}((1 - 0.97145^2) \times (1 - (-0.87412)^2)) = -0.388670485$$

Коефіцієнти часткової кореляції характеризують тісноту зв'язку між двома змінними, виключивши вплив третьої змінної. Зв'язок між загальною кількістю генерованої енергії і кількістю модулів СБ за винятком впливу величини середньозваженої кількості генерованої енергії зворотний і помітний. Тоді між загальною кількістю генерованої енергії та середньозваженою кількістю генерованої енергії без урахування кількості модулів СБ зворотна, але слабка; зв'язок між факторами $X1$ та $X2$ – помірний.

Порівняємо відповідні коефіцієнти парної та часткової кореляції: $R_{Y(X1)} = 0.97145$, $R_{Y(X2)} = -0.87412$,

$R_{X_1(X_2)} = -0.89395$; $R_{YX_1 \cdot X_2} = 0.87296$, $R_{YX_2 \cdot X_1} = -0.05355$, $R_{X_1 \cdot X_2 \cdot Y} = -0.38867$.

При закріпленні фактора X_2 на постійному рівні вплив на Y фактора X_1 виявилось дещо менш сильним (0,97145 проти 0,87296), залишається помітним. При закріпленні фактора X_1 на постійному рівні вплив на Y фактора X_2 стало дуже слабким оберненим (-0.05355 проти -0.87412). Міжфакторний зв'язок (-0.38867) свідчить щодо низької колінеарності факторів, причому виключивши вплив результативної змінної у цей зв'язок стає помірним.

Оцінимо значущість рівняння регресії та коефіцієнта множинної детермінації за допомогою F -критерію Фішера. Значення критерію, що спостерігається:

$$F_{\text{observed}} = (0.9241) / (1 - 0.9241) \times ((31 - 2 - 1) / 2) = 170.3694$$

Табличне значення критерію за рівня значимості $\alpha = 0,05$, число ступенів свободи $k_1 = m = 2$ та $k_2 = n - m - 1 = 31 - 2 - 1 = 28$. Тоді $F_{\text{table}} = F(0.5; 2; 28) = 3.33$.

Так як $F_{\text{table}} < F_{\text{observed}}$, то з ймовірністю $1 - \alpha = 0,95$ робимо висновок про статистичну значущість рівняння регресії та коефіцієнта множинної детермінації, які сформувалися під не випадковим впливом факторів X_1 та X_2 .

Оцінимо доцільність включення до рівняння множинної регресії фактора X_1 після фактора X_2 та доцільність включення фактора X_2 після фактора X_1 за допомогою приватних F -критеріїв F_{X_1} та F_{X_2} .

$$F_{X_1 \text{ observed}} = ((0.9241 - (-0.87412)^2) / (1 - 0.9241)) \times 14 = 29.49647$$

$$F_{X_2 \text{ observed}} = ((0.9241 - 0.97145^2) / (1 - 0.9241)) \times 14 = -3.62141$$

Знайдемо табличні значення критерію лише на рівні значимості $\alpha = 0.05$, $k_1 = m = 1$, $k_2 = n - m - 1 = 31 - 2 - 1 = 28$. Тоді $F_{\text{table}} = F(0.5; 1; 28) = 4.2$.

Оскільки $F_{X_1 \text{ observed}} > F_{\text{table}}$, то включення до моделі фактора X_1 (кількість модулів СБ) після фактора X_2 статистично виправдано і коефіцієнт b_1 при факторі X_1 статистично значущий.

Також $F_{X_2 \text{ observed}} < F_{\text{table}}$, то недоцільно включати до моделі фактор X_2 (середньозважена кількість генерованої енергії) після фактора X_1 . Це означає, що парна регресія залежності загальної кількості генерованої енергії від кількості модулів СБ є досить статистично значущою, надійною і що не потрібно поліпшувати її, включаючи додатковий фактор X_2 .

Знайдемо рівняння парної регресії $y = a + bx_1$, де y – загальна кількість генерованої енергії (кВт), x_1 – кількість модулів СБ (штук):

$$b = ((1.54209E+11) - 19730.87 \times 6089116) / (12682.5954^2) = 211.78705$$

$$a = 6089116 - 211.78705 \times 6088904.50327$$

На основі прямого розрахунку коефіцієнтів регресії визначено аналітичний вигляд моделі, при цьому розділимо рівняння на 1000 (переведемо у кВт):

$$Y = 6088.9045 + 0.2118X_1. \quad (2)$$

Підтвердженням доцільності активізації отримання енергії є результати отриманого вище проведеного регресійного аналізу. А саме, найбільший вплив на обсяг загальної кількості генерованої енергії відіграє саме середньозважена кількість генерованої енергії.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Здійснено аналіз розподілу вихідних даних моделі за кількістю модулів сонячних батарей на прикладі наземних сонячних установок. Відокремлено 10 інтервалів з відповідними діапазонами кількості модулів у відповідних конструктиву СБ. Вихідні дані із кількості модулів СБ мають нормальний розподіл, скошений вліво. Це дозволяє визначити вибірку як репрезентативну – її параметри співпадають з параметрами генеральної сукупності в межах заданої допустимої похибки.

Побудована регресійна моделі залежності загальної кількості генерованої енергії від кількості модулів СБ та середньозваженої кількості генерованої енергії. Але гістограма залишків дещо відрізняється від нормального закону. Графіки частинної кореляції свідчать про гарне наближення до лінійного зв'язку за усіма незалежними змінними. Зі збільшенням загальної кількості генерованої енергії більш на 1 кВт кількість модулів СБ збільшується в середньому на 0,2063 кВт, а зі збільшенням Y на 1 кВт середньозважена кількість генерованої енергії зменшується в середньому на 0,2757 кВт.

Розвиток даного дослідження полягає у розробці сценаріїв функціонування сонячних батарей на основі зміни та взаємодії факторів (концептів) з застосуванням імпульсного та агентного моделювання. Це дозволить розробити впровадження необхідних механізмів попередження, захисту та контролю у позаштатних ситуаціях доступу на відповідних рівнях енергетичної інфраструктури.

References

1. Abdmouleh Z., Gastli A., Ben-Brahim L., Haouari M., Al-Emadi N. A. Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources. *Renewable Energy*, 2017, 113, 266–280. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>

2. Chang R. D., Zuo J., Zhao Z. Y., Zillante G., Gan X. L., Soebarto V. Evolving theories of sustainability and firms: History, future directions and implications for renewable energy research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.029>
3. Xu X., Wei Z., Ji Q., Wang C., Gao G. Global renewable energy development: Influencing factors, trend predictions and countermeasures. *Resources Policy*, 2019, 63, 101470. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101470>
4. Ibidunni A. S., Ogunnaiké O. O., Abiodun A. J. Extending the knowledge strategy concept: linking organizational knowledge with strategic orientations. *Academy of Strategic Management Journal*, 2017, 16(3). URL: <http://eprints.covenantuniversity.edu.ng/11867/#.XsJBdYgzZPZ>
5. Che L., Zhang X., Shahidehpour M., Alabdulwahab A., Abusorrah A. Optimal interconnection planning of community microgrids with renewable energy sources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(3), 1054–1063. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2456834>
6. Kuma A., Sah B., Singh A. R., Deng Y., He X., Kumar P., Bansal R. C. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69, 596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
7. Chen H. H., Lee A. H., Kang H. Y. The fuzzy conceptual model for selecting energy sources. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2017, 12(4), 297–304. <https://doi.org/10.1080/15567249.2011.652339>
8. Nakashidze L., Hilorme T., Nakashydze I. Substantiating the criteria of choosing project solutions for climate control systems based on renewable energy sources. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 3 (3 (105)), 42–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201527>
9. Hilorme T., Nakashydze L., Mazyrik S., Gabrinets V., Kolbunov V., Gomilko I. Substantiation for the selection of parameters for ensuring electro-thermal protection of solar batteries in spacecraft power systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 3(8 (117)), 17–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258480>
10. Nakashydze L.V., Hilorme T.V. Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects. New York: Yunona Publishing, 2019. 134 p.