

ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ, ЯК КЛЮЧОВОГО ФАКТОРА ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

¹Національний університет «Одеська політехніка»

Проаналізовано декілька моделей прогнозування надходження сонячної радіації на земну поверхню для можливості точнішого прогнозування генерації електричної енергії від сонячних фотоелектричних панелей. Інтенсивність сонячної радіації в будь-який момент часу є найвагомішим фактором, який безпосередньо впливає на роботу фотоелектричних панелей, і у разі проведення технічних або економічних обґрунтувань спорудження проектів значну роль відіграє обсяг енергії, який можна отримати для них. Для цих цілей виробниками фотоелектричного обладнання та фірмами, які займаються їхньою реалізацією створено безліч «сонячних калькуляторів», які дозволяють миттєво отримати результат, однак через комерційну зацікавленість моделі, на які орієнтуються ці калькулятори, досить часто дають завищені показники, які не відповідають реальним значенням. Разом з тим існують і багато спеціалізованих програмних комплексів, які використовують точніші моделі надходження сонячної радіації на земну поверхню, але проведений в роботі аналіз показав, що навіть ці моделі схильні давати велику похибку. Подано огляд основних емпірично кореляційних моделей, які використовують різні метеорологічні показники для прогнозування надходження сонячної радіації, а також три моделі, які дозволяють отримати інтенсивність сонячної радіації у будь-який момент часу. За всіма представленими моделями проведено розрахунок на річному інтервалі та поєднані з відкритими даними про сонячні надходження від НАСА, а для місяців з найбільшою інтенсивністю сонячної радіації, коли генерація фотоелектричних панелей є найбільшою проводився порівняльний аналіз з експериментальними даними. На основі отриманих результатів розрахунків проведено порівняльний аналіз результатів з експериментальними даними та визначені похибки і причини їх виникнення. Також визначено найточнішу модель, яка дозволяє отримувати дані про інтенсивність сонячної радіації з відносною похибкою $\pm 5\%$ для Одеського регіону.

Ключові слова: сонячна радіація, моделі сонячних надходжень, емпірично кореляційні моделі, метеорологічні дані, відносна похибка, порівняльний аналіз.

Вступ

Зруйнованість значної частки генерувальних потужностей електроенергетичної системи щоразу більше спонукає людей та уряд звертати увагу на відновлювані джерела енергії, включаючи їх в концепцію розподіленої генерації. Одним з найпріоритетніших напрямків, який стрімко розвивається в Україні, є спорудження дахових сонячних електростанцій на дахах житлових багатоповерхових будинків та будівель комунальної власності. Разом з тим ці проекти в більшості випадків реалізуються за рахунок грантових коштів або державних/місцевих програм. Одним з найважливіших аспектів проектів, які реалізуються за цими програмами, є оцінка доцільності встановлення та оцінка обсягів отриманої електричної енергії протягом певного періоду або за вказаний термін, тому наявність математичного інструментарію, який дозволить з досить великою точністю давати оцінку згенерованої потужності є актуальною науково-прикладною задачею.

Метою роботи є аналіз точності прогнозування надходження сонячної радіації на земну поверхню окремих математичних моделей.

Результати дослідження

У відкритих джерелах інформації міститься величезна кількість різних моделей, які дозволяють прогнозувати надходження сонячної радіації на земну поверхню. Після попереднього аналізу встановлено, що серед всіх моделей можна виділити дві великі групи моделей, а саме: емпіричні кореляційні та умовно «точні». Емпірично кореляційні побудовані на основі взаємозв'язку основних метеорологічних показників з сонячною радіацією, в той час як точні моделі, базуються здебі-

льшого на сонячній константі та математичному описі руху Сонця по небосхилу. Кореляційні моделі також є досить простими та легкими у використанні, що з достатньою точністю можуть суттєво прискорити розрахунки та загальну оцінку проекту. Серед емпіричних моделей розглянуто такі групи:

- емпірична модель сонячної радіації в функції від сонячного випромінювання;
- емпірична модель сонячної радіації в функції від хмарності;
- емпірична модель сонячної радіації в функції від температури;
- емпіричні моделі сонячної радіації в функції від інших метеорологічних параметрів.

Емпірична модель сонячної радіації в функції від сонячного випромінювання використовує коефіцієнт сонячного сьйва, який є відношенням тривалості сонячного сьйва конкретної доби до середньомісячної тривалості сонячного сьйва, і в загальному випадку визначається рівнянням [1]

$$\frac{E}{E_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right); \quad (1)$$

де E — середньомісячна добова глобальна радіація на горизонтальній поверхні, Вт/(м²·день);
 E_0 — середньомісячна добова позаземна радіація на горизонтальній поверхні, Вт/(м²·день);

a, b — емпіричні коефіцієнти, що коливаються в залежності від місця розташування об'єкта, що розглядається, та автора моделі, в. о.; S — місячна середньодобова тривалість сонячного сьйва, год.

Середньомісячну добову глобальну радіацію на горизонтальній поверхні можна визначити як [2], [3]

$$E_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta \right], \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{день}}, \quad (2)$$

де ω_s — годинний кут заходу сонця, °; δ — кут сонячного схилення, °; φ — географічна широта місцевості, °.

Максимальна можлива тривалість сонячного сьйва визначається таким виразом

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_s, \text{ год.} \quad (3)$$

На основі результатів спостережень науковцями запропоновано універсальні емпіричні коефіцієнти, які дорівнюють 0,18 та 0,62 відповідно, проте подальший розвиток точності прогнозування дозволив виразити ці коефіцієнти через залежності

$$a = 0,10 + 0,24 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2, \quad (4)$$

$$b = 0,38 + 0,08 \left(\frac{S}{S_0} \right). \quad (5)$$

Для багатьох країн світу ці емпіричні коефіцієнти визначаються науковцями з урахуванням їхнього географічного розташування, проте аналіз літератури показав, що найближчою країною, для якої визначені ці емпіричні коефіцієнти є Туреччина, але їхнє використання є повністю недоцільним для практичних розрахунків в нашій країні.

В емпіричній моделі сонячної радіації в функції від хмарності, потік сонячної енергії описується рівнянням [4], [5]

$$\frac{E}{E_0} = 0,803 - 0,340C - 0,458C^2, \quad (6)$$

де C — середня загальна хмарність протягом денних спостережень, при цьому вводиться обмеження, що $C \leq 0,8$.

Точнішою моделлю, яка дозволяє оцінювати сонячні надходження з урахуванням хмарності, є модель, що безпосередньо визначає окремо надходження прямої та окремо надходження дифузної радіації, описані рівняннями

$$E_b = 3,42286 \left[1 - \exp(-0,075(90 - \theta)) \right], \quad (7)$$

$$E_d = 0,00913 + 0,0125(90 - \theta) + 0,723CF, \quad (8)$$

де CF — фактор хмарності.

А сумарна добова радіація на горизонтальній площині за будь-який інтервал часу визначається як

$$H = (1 - CF) \int_{\text{sunrise}}^{\text{sunset}} I_b(\theta) \cos \theta dt + \int_{\text{sunrise}}^{\text{sunset}} I_d(\theta) dt. \quad (9)$$

Фактор хмарності змінюється від 0 для ясного неба до 1 для хмарного неба, цей параметр можна отримати, використовуючи кількість хмарних днів у кожному місяці та хмарність.

Емпірична модель сонячної радіації в функції від температури використовує для оцінки обсягів сонячної радіації різницю між максимальною та мінімальною температурою [6], [7]

$$\frac{H}{H_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0,5}, \quad (10)$$

де T_{\max} — максимальна температура, °C; T_{\min} — мінімальна температура, °C; a — емпіричний коефіцієнт, який $a = 0,17$ для посушливих і напівпосушливих регіонів, $a = 0,16$ — для внутрішніх регіонів та $a = 0,19$ — для прибережних регіонів.

Також для вдосконалення цієї моделі запропоновано введення коригувального коефіцієнта, який врахував залежність між атмосферним тиском та температурою [8]

$$\frac{H}{H_0} = K_r (T_{\max} - T_{\min})^{0,5}, \quad (11)$$

де K_r — функція зміни атмосферного тиску.

$$K_r = k_{ra} \left(\frac{P_s}{P_0} \right)^{0,5}, \quad (12)$$

де k_{ra} — емпіричний коефіцієнт, який дорівнює: $k_{ra} = 0,17$ для внутрішніх регіонів та $k_{ra} = 0,20$ для прибережних [16], в. о.; P_s — атмосферний тиск місцевості, кПа; P_0 — нормальний атмосферний тиск на рівні моря ($P_0 = 101,3$ кПа).

Щодо точніших моделей, то розглянуто такі моделі як ASHARE 2001, Hottel та ASHARE 2009. Зазначені моделі є досить популярними та використовуються в прикладних програмах [9], окрім цього зазначені моделі не мають точної прив'язки до географічних координат, що дозволяє їх використовувати в наших широтах та має гарантувати достатню точність за використання вищезгаданих методиках. В моделі ASHARE 2001 сонячна радіація розглядається як сукупність трьох складових чинників, прямої радіації, дифузної та віддзеркаленої. Пряма радіація в безхмарний день може бути визначена як

$$E_{DN} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin \beta}\right)}, \text{ Вт/м}^2, \quad (13)$$

де A — видиме сонячне випромінювання, коли маса повітря $m = 0$, Вт/м²; B — атмосферний коефіцієнт екстинкції, в. о.; β — висота Сонця на небі, °.

Дифузна радіація, на будь-якій поверхні окрім вертикальної визначається як

$$E_d = CE_{DN} \frac{1 + \cos \Sigma}{2}, \text{ Вт/м}^2, \quad (14)$$

де C — довідниковий коефіцієнт, в. о.; Σ — кут нахилу поверхні, °.

Віддзеркалене від поверхні землі сонячне випромінювання визначається за формулою

$$E_r = E_{DN} (C + \sin \beta) \rho_g \frac{1 - \cos \Sigma}{2}, \quad (15)$$

де ρ_g — коефіцієнт відбиття ґрунту, в. о.

В моделі Hottel інтенсивність сонячної радіації на поверхню можна визначити як

$$E_{snb} = G_{on} \tau_b, \text{ Вт/м}^2, \quad (16)$$

де G_{on} — позаземне випромінювання, визначене для i -го дня.; τ_b — коефіцієнт пропускання атмосфери для випромінювання, в. о.

$$E_{on} = \begin{cases} E_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right), \\ E_{sc} (1,00011 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B), \end{cases} \quad (17)$$

де E_{sc} — сонячна константа, Вт/м²; B — добовий кут.

Пряма радіація в цій моделі визначається виразом

$$E_b = E_{on} \tau_b \cos \theta_z, \text{ Вт/м}^2. \quad (18)$$

Дифузна

$$E_d = E_b \tau_d, \text{ Вт/м}^2. \quad (19)$$

де τ_d — відношення дифузного випромінювання до позаземного випромінювання в горизонтальній площині.

$$\tau_d = \frac{E_d}{E_0} = 0,271 - 0,294 \tau_b. \quad (20)$$

Модель ASHARE 2009 [19] розглядає як і попередня модель сонячне випромінювання як дві складові, а саме

– пряма сонячна радіація $E_b = E_0 \exp[-\tau_b m^{ab}], \text{ Вт/м}^2;$ (21)

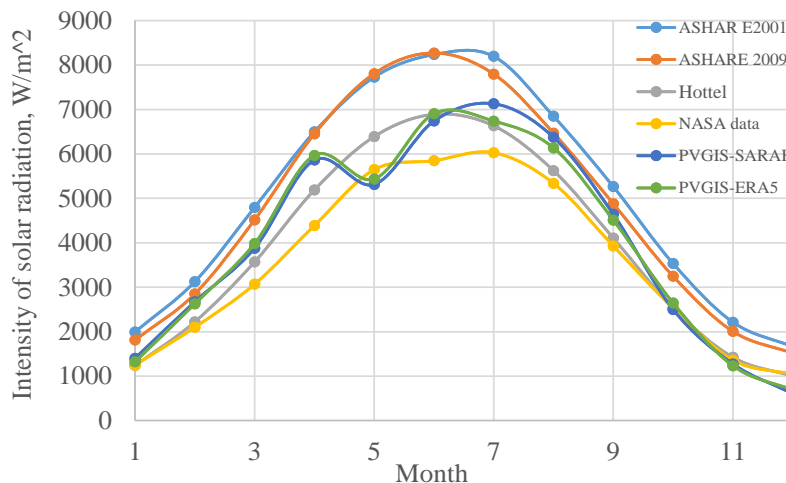
– дифузна сонячна радіація $E_d = E_0 \exp[-\tau_d m^{ad}], \text{ Вт/м}^2,$ (22)

де E_0 — позаземний променевий потік, Вт/м²; τ_b, τ_d — псевдо оптичні глибини прямого та дифузного випромінювання, залежать від пори року, в. о.; m — відносна повітряна маса, в. о.; ab, ad — показники прямої та дифузної повітряних мас, в. о.

$$m = \frac{1}{\sin \beta + 0,50572 (6,07995 + \beta)^{-1,6364}}, \text{ в. о.}; \quad (23)$$

$$ab = 1,219 - 0,043 \tau_b - 0,151 \tau_d - 0,204 \tau_b \tau_d, \text{ в. о.}; \quad (24)$$

$$ad = 0,202 + 0,852 \tau_b - 0,007 \tau_d - 0,357 \tau_b \tau_d, \text{ в. о.} \quad (25)$$



Таким чином, провівши розрахунки за кожною моделлю для кожної доби року з інтервалом в 1 годину для міста Одеси, отримано погодинні та добові суми. На місячному інтервалі добові суми усереднені, а вже усереднені значення порівнювалися між собою та з відкритими даними з сайту НАСА та сервісу PVGIS за 2020 рік, результати розрахунків показані на рис. 1.

Як впливає з рис. 1, отримано досить суттєві різниці між розрахунковими даними та даними НАСА. Дані НАСА використовув-

Рис. 1. Порівняння середньомісячних сум за трьома моделями з відкритими даними НАСА та сервісу PVGIS

ються для порівняння, оскільки більшість державних стандартів і будівельних норм в галузі будівельної кліматології використовують саме ці значення, а аналіз сучасної нормативної літератури та нормативних даних минулого сторіччя показав, що різниця в показниках є зовсім незначною. Для вибору найточнішої моделі отримані розрахункові значення додатково порівняли з експериментальними даними. Експериментальні дані отримані з метеорологічного поста, встановленого на території Національного університету «Одеська політехніка», протягом року з цього метеорологічного поста отримано дані про надходження сонячної інсоляції на інтервалі пів години, після переведення експериментальних даних у середньомісячні добові суми визначено відносні похибки для кожної з трьох моделей (див. рис. 1).

Таким чином моделі ASHARE 2001 та ASHARE 2009 показали приблизно однакові похибки,

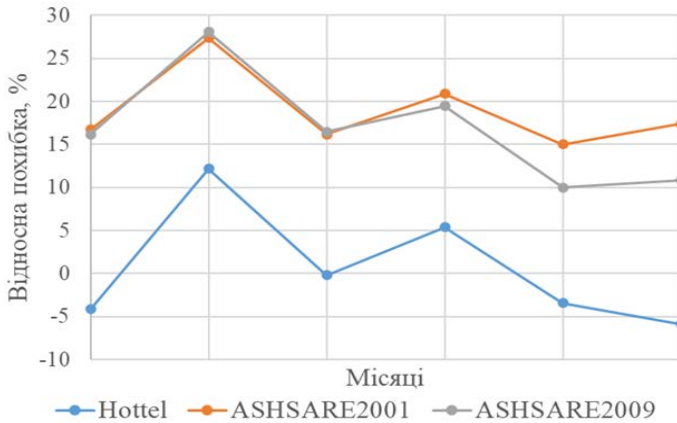


Рис. 2. Відносні похибки розрахункових моделей з експериментальними даними для місяців найактивнішої роботи фотоелектричних панелей з квітня по вересень

але їхня величина є занадто великою для того щоб їх можна було використовувати для точного прогнозування, модель Hottel у цьому порівнянні є найадекватнішою моделлю, яка майже протягом всього періоду показує значення відносної похибки в межах $\pm 5\%$, проте для травня місяця навіть за цією моделлю відносна похибка складає понад 12% , що недопустимо. Детальний аналіз експериментальних даних показав, що під час роботи метеорологічного поста траплявся тимчасовий збій, і на отриманому відрізу часу дані про сонячну інсоляцію отримані випадковим чином за рахунок вбудованої логіки обробки інформації, і тому реальні суми протягом періоду, в якому відбувся збій з графіка, отриманого з метеорологічного поста, могли бути значно більші, що відповідно зменшило би сумарну похибку для цього місяця. Оскільки втрачені дані відновити неможливо, до для коригування похибки в цьому місяці, проведено розрахунок сонячної інсоляції для 1 дня місяця травня та отримані результати зіставлено з експериментальними за той самий день. При цьому день вибирався з максимально безхмарною погодою для більшої точності порівняння даних, оскільки всі три моделі обумовлюють наявність чистого неба.

Як можна побачити з рис. 3, для того самого дня, присутня різниця між експериментальними та розрахунковими даними, але з урахуванням навіть такої візуально великої різниці між отриманими даними, середньодобова різниця суми надходження становить $5,2\%$, що є достатньо адекватним показником.

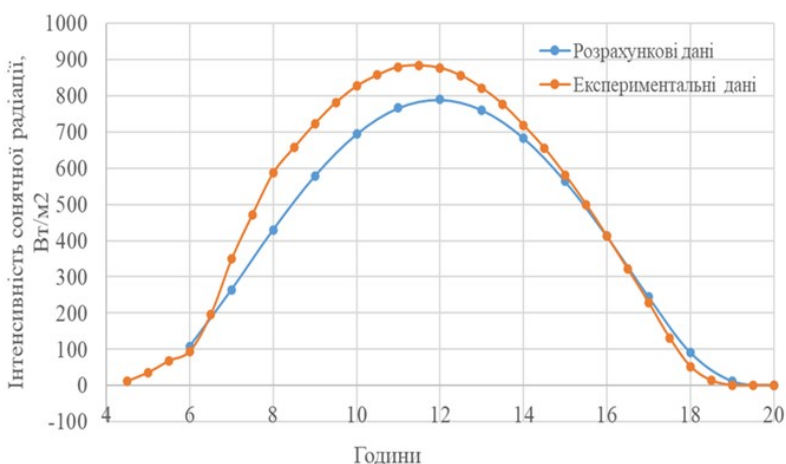


Рис. 3. Порівняння розрахункових даних за моделлю Hottel та експериментальних даних за той самий день

використовують ці моделі, проведено розрахунок середньодобових сум сонячної радіації, проте отримані результати значно перевищують середньодобові суми за зазначеними трьома моделями. Порівняння цих моделей показано на рис. 4.

Детально проаналізувавши експериментальні дані за інші місяці, знайдено ще декілька незначних збоїв в роботі метеорологічного поста, але провали в отриманні результатів переважно відбувалися у нічний час та рано вранці, коли інтенсивність сонячної радіації або взагалі відсутня або є мінімальною, разом з тим незначне збільшення добових надходжень сонячної інсоляції на поверхню викликає зменшення похибок розрахункової моделі. Що стосується емпірично кореляційних моделей, то з урахуванням відкритих даних, які

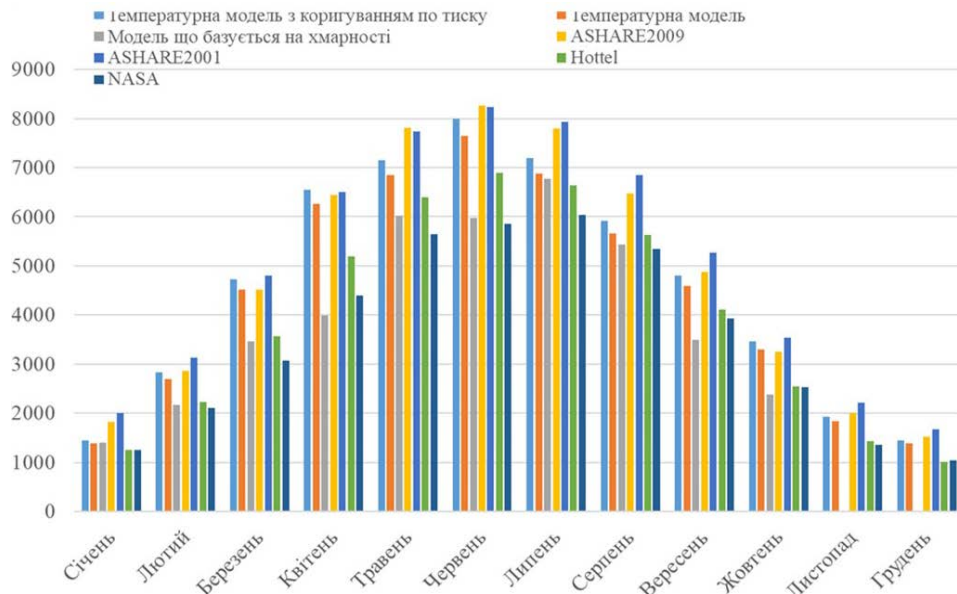


Рис. 4. Порівняння середньодобових сум сонячної радіації за різними моделями

Отже, детально проаналізувавши емпірично кореляційні моделі встановлено, що графіки моделей, які мають безпосередній зв'язок сонячної радіації з іншими метеорологічними показниками [10], [11], мають форму, ближчу до реальних даних, проте розраховані значення сонячної інсоляції в окремих випадках можуть бути більшими у 2 рази. Така розбіжність в отриманих результатах насамперед пояснюється непристосованістю цих моделей до наших широт. Оскільки емпіричні коефіцієнти мають досить вагомий вплив на результати розрахунків, то їхня точність для певної місцевості впливає безпосередньо на точність розрахунків. Через те, що найбільше наукових досліджень з визначення таких коефіцієнтів проводились для південних регіонів планети, то в нашому випадку доводиться користуватися виключно універсальними коефіцієнтами, які не враховують повною мірою всі погодні умови нашої місцевості.

Висновок

Отже, проведений аналіз моделей надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню показав, що більшість із зазначених моделей дає завищені дані про надходження сонячної радіації. Навіть точніші моделі, які використовуються у багатьох спеціалізованих програмних комплексах, дають досить великі похибки середньодобових сум надходжень сонячної радіації. Здебільшого отримані великі похибки можна пояснити тим, що всі представлені моделі розроблялися закордонними науковцями під конкретні запити для регіонів з помірнішими широтами, і в більшості випадків, як з моделями ASHARE 2001 та ASHARE 2009, довідникові коефіцієнти та величини, що використовуються у розрахунках в першоджерелах, подані для США, проте інформація про зміну цих показників зі зміною географічної широти та довготи не наводиться. Тому серед зазначених моделей найточнішою є модель Hottel, яка дозволяє визначити надходження сонячної радіації на поверхню з похибкою $\pm 5\%$.

Отримані результати демонструють, що у разі точного та детального прогнозування роботи сонячних фотоелектричних панелей слід детальніше визначитися з методами розрахунку, а також перевірити програмне забезпечення інших країн на адекватність роботи саме в Україні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] F. Ahmad, and I. Ulfat, "Empirical models for the correlation of monthly average daily global solar radiation with hours of sunshine on a horizontal surface at Karachi, Pakistan," *Turkish Journal of Physics* no. 28, pp. 301-308, 2004.
- [2] М. Ю. Шабовта, і В. О. Разінков, «Оцінка енергетичних, температурних та економічних характеристик гібридних колекторів,» *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, № 36 (112), с. 18-26, 2022.

[3] В. О. Разінков, В. О. Суворов, «Перспективи використання геліоенергетики для енергопостачання і місті Одеса» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 29-36, 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36>.

[4] Кулик Я. А. «Розробка системи стеження за рухом сонця для підвищення ККД сонячних електростанцій», *Вісник Національного технічного університету ХПІ, серія: Механіко-технологічні системи та комплекси*, № 20, с. 19-24, 2017.

[5] Н. Р. Garg, “Solarradiation. Fundamentals and characteristics of solar radiation,” *Renewable Energy*, vol. 3, no 4/5, pp. 305-319, 1993.

[6] J. A. Duffie, and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley, 1991.

[7] M. El-Metwally, “Sunshine and global solar radiation estimation at different sites in Egypt,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 67, no 14, pp. 1364-1342, 2005.

[8] E. Tasdemiroglu, and R. Sever, “An improved correlation for estimating solar radiation from bright sunshine data for Turkey,” *Energy Conversion and Management*, no. 31(6), pp. 599-600, 1991.

[9] Наукова електронна бібліотека періодичних видань НАН України [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/142463>. Дата звернення: Лип. 04, 2024.

[10] Метеопост. Клімат Одеси (кліматична норма) [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://meteorpost.com/weather/climate-normals/odessa/>. Дата звернення: Лип. 23, 2024.

[11] Погода в місті Одеса. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://pogoda.meta.ua/ua/Odeska/Odeskiy/Odesa/archive/>. Дата звернення: Лип. 04, 2024.

Рекомендовано кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.07.2024

Разінков Владислав Олексійович — старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, e-mail: razinkov.v.o@op.edu.ua.

Національний університет «Одеська політехніка», Одеса

V. O. Razinkov¹

Determination of Solar Radiation Intensity as a Key Factor for Predicting the Operation of Photoelectric Panels

¹National University "Odesa Polytechnic"

This article analyzes several models of forecasting the arrival of solar radiation on the earth's surface for the possibility of more accurate forecasting of the generation of electrical energy from solar photovoltaic panels. The intensity of solar radiation at any moment of time is the most significant factor that directly affects the operation of photovoltaic panels, and the amount of energy that can be obtained for them, plays a significant role when conducting technical or economic justifications for the construction of projects. For these purposes, manufacturers of photovoltaic equipment and companies engaged in their implementation have created many "solar calculators" that allow to get results instantly, however, due to the commercial interest of the models on which these calculators are oriented, quite often they give inflated indicators that do not correspond to real values. At the same time, there are many specialized software complexes that use more accurate models of the arrival of solar radiation on the earth's surface, but the analysis carried out in the work showed that even these models tend to give a high error. The work provides an overview of the main empirically correlated models that use various meteorological indicators to predict the arrival of solar radiation, as well as three models that allow obtaining the intensity of solar radiation at any moment in time. All presented models were calculated on an annual interval and combined with open data on solar input from NASA, and for the months with the highest intensity of solar radiation, when the generation of photovoltaic panels is the largest, a comparative analysis was conducted with experimental data. On the basis of the obtained results, the comparative analysis of the results was made, errors and causes of their emergence were determined, the most accurate model was also determined, which allows obtaining data on the intensity of solar radiation with a relative error of $\pm 5\%$ for the Odesa region.

Keywords: solar radiation, models of solar arrivals, empirically correlated models, meteorological data, relative error, comparative analysis.

Razinkov Vladyslav O. — Senior Lecturer with the Chair of Power Supply and Energy Management, e-mail: razinkov.v.o@op.edu.ua