

# ОПТИМІЗАЦІЯ КУТІВ НАХИЛУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Ушкаленко О.В., аспірант, Гаєвський О.Ю., д.ф.-м.н., проф.

НТУУ «КПІ», кафедра відновлюваних джерел енергії

**Вступ.** Конструкція фотоелектричних станцій (ФЕС) повинна забезпечувати максимальне використання сонячної радіації для генерування електричної енергії. Кількість генерованої та спожитої енергії залежить від ряду факторів: часових профілів навантаження та радіації, кута нахилу і орієнтації панелей фотомодулів (ФМ), температури робочих елементів ФМ, навантажувальних та температурних характеристик ФМ, параметрів інверторів та іншого обладнання. На даний момент опубліковано багато робіт, що присвячені оптимізації конструкційних параметрів, які впливають на сумарний виробіток ФЕС впродовж тривалого інтервалу часу.

**Мета роботи.** У даній роботі запропонований метод оптимізації кута нахилу та орієнтації панелей ФМ.

**Матеріали і результати досліджень.** Припускаємо, що максимальна ефективність ФЕС досягається, коли забезпечуються максимальний прихід радіації за робочий період. Критерієм при виборі оптимального кута нахилу є максимум суми радіації за робочий період. Запишемо спочатку формули для складових частин повної радіації для  $j$ -го дня року:

- добова сума прямої радіації

$$E_{Br}(j) = \int_{T_j} I_{Bn}(\tau) \cos(\theta(\tau)) d\tau = I_0 \int_{T_j} \exp(-Bm(\tau)) \cos(\theta(\tau)) d\tau,$$

де  $I_{Bn}(\tau)$  - інтенсивність прямої радіації на поверхні, нормальній до напрямку розповсюдження сонячних променів,  $I_0$  - інтенсивність випромінювання на верхній межі атмосфери,  $m(\tau)$  - атмосферна маса, яка для експоненціальної моделі пропорційна довжині шляху сонячних променів у атмосфері і тому залежить від часу  $\tau$ ,  $\theta(\tau)$  - кут падіння (між нормаллю до приймаючої поверхні та напрямом до сонця);

- дифузна радіація

$$E_{Dr}(j) = F_{ss} \int_{T_j} I_D(\tau) d\tau = CF_{ss} \int_{T_j} I_{Bn}(\tau) d\tau,$$

де  $I_D(\tau)$  - дифузна радіація на горизонтальну поверхню,  $F_{ss} = (1 + \cos \beta) / 2$  - кутовий фактор "sky-surface",  $C$  - емпіричний коефіцієнт,  $I_D = CI_{Bn}$ ;

- відбита радіація

$$E_{Rr}(j) = F_{sg} \int_{T_j} I_R(\tau) d\tau,$$

де  $F_{sg} = (1 - \cos \beta) / 2$  - кутовий фактор "sky-ground",  $I_R$  - інтенсивність відбитої короткохвильової радіації, яка визначається відбивальною здатністю земної поверхні (альбедо)  $\rho_g$

$$I_R(\tau) = \rho_g [I_{Bn}(\tau) + I_D(\tau)] = (C + \cos \phi(\tau)) I_{Bn}(\tau),$$

де  $I_B(\tau)$  і  $I_D(\tau)$  - інтенсивність прямої та дифузної радіації на горизонтальній поверхні. Тоді добова сума повної радіації:

$$E_{total,t}(j) = E_0(j) + \int_{T_j} I_{Bn}(\tau) \left\{ \cos \theta(\tau) + \frac{1}{2} [C(1 - \rho_g) - \rho_g \cos \phi(\tau)] \cos \beta \right\} d\tau,$$

де  $E_0(j)$  - доданок, що не залежить від кута нахилу панелі  $\beta$ , рівний

$$E_0(j) = \frac{1}{2} \int_{T_j} I_{Bn}(\tau) [C(1 + \rho_g) + \rho_g \cos \phi(\tau)] d\tau,$$

Загальний прихід радіації на одиницю площі нахиленої поверхні за робочий період можна знайти додаючи добові значення  $E_{total,t}(j)$ :

$$E_{total,t} = \sum_{j=T_1}^{T_N} E_{total,t}(j),$$

де  $T_1, T_N$  - початковий та кінцевий дні робочого періоду. Оптимальний кут нахилу панелей знайдемо із умови максимуму  $E_{total,t}$ :

$$\frac{\partial E_{total,t}}{\partial \beta} = 0,$$

що призводить до виразу

$$\operatorname{tg} \beta_{opt} = \frac{\sum_{j=T_1}^{T_N} \int_{T_j} I_B(\tau) \operatorname{tg} \phi(\tau) \cos(z(\tau) - z_s) d\tau}{\sum_{j=T_1}^{T_N} \left\{ \left(1 - \frac{1}{2} \rho_g\right) \int_{T_j} I_B(\tau) d\tau + \frac{1}{2} (1 - \rho_g) \int_{T_j} I_D(\tau) d\tau \right\}}.$$

Отримана рівність є більш загальною, ніж відома із літератури [1, 2] формула для оптимального кута нахилу. У останній не враховується дифузна та відбита компоненти радіації, а також добові залежності Zenітного та азимутального сонячних кутів.

Для прикладу був виконаний розрахунок оптимальних кутів нахилу фотомодуля для міста Запоріжжя та різних робочих періодів, який був проведений із використанням довідникових даних [3], отриманих від локальних актинометричних станцій та бази даних NASA [4], отриманих шляхом інтерполяції супутникових даних.

**Висновки.** Розрахунок показав можливість реалізації методу на основі даних метеоспостережень, а також задовільну збіжність значень кутів при врахуванні прямої та дифузної компонент радіації. При врахуванні лише прямої радіації кут нахилу мав завищені значення.

#### Перелік посилань

1. *Rahman M.M., Shareef S., Rahman R. et al.* Computation of solar radiation tilt factor and optimum tilt angle for Banladesh//Indian Journ. Of Radio & Space Physics. – 1999. – V.29. – P.37 – 40.
2. *Kern J., Harris I.* On the optimum tilt of a solar collector// Solar Energy. – 1975. – V.17. – N 5. – P.97–102.
3. Справочник по климату СССР. Украинская ССР. Часть I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние // Ленинград: Гидрометеорологическое изд. – 1966. – 126 с.
4. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/global.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>