

УДК 658.511.54:620.91:620.92

О.В.Ушкаленко (Національний Технічний Університет України "КПІ", Київ)

Визначення оптимального кута нахилу фотоелектричних панелей з урахуванням анізотропії сонячної радіації

У даній статті проводиться порівняння значень оптимальних кутів нахилу фотоелектричних панелей, знайдених аналітично з умови максимізації кількості сонячної радіації, що надходить на сприймаючу поверхню фотоелектричної панелі. Оптимальні значення кутів нахилу знаходилися із використанням моделей сонячної радіації різних типів (ізотропної та анізотропних) і для різних періодів роботи фотоелектричної станції. Вхідними даними для розрахунків оптимальних кутів нахилу, що наведені у даній статті, є дані багаторічних метеорологічних спостережень для міст України. Бібл. 8, табл. 1.

Ключові слова: фотоелектричні панелі, оптимальний кут нахилу, сонячна радіація, анізотропні моделі.

ORCID: 0000-0002-9628-011X

Як відомо, кут нахилу фотоелектричної панелі (ФП) є важливим чинником, що впливає на ефективність роботи ФП. На фотоелектричних станціях (ФЕС) без системи зміни орієнтації ФП у просторі вибір оптимального кута нахилу має визначне значення, адже безпосередньо впливає на ефективність перетворення наявних ресурсів сонячної радіації. Кут нахилу є конструкційним параметром ФЕС і не залежить від параметрів обладнання, таких як навантажувальна та температурна характеристика ФП, коефіцієнт перетворення інвертора та ін. Перевагою конструкційних параметрів є те, що вони можуть бути змінені без заміни основного обладнання ФЕС (ФП, інвертори, акумуляторні батареї).

Для визначення оптимального кута нахилу ФП існують емпіричні та емпірично-аналітичні формули [1], які враховують широту місцевості розташування ФЕС, але вони не дають змоги точно визначити оптимальний кут нахилу саме для конкретної місцевості з характерним профілем сонячної радіації. Якщо брати до уваги ФЕС із сезонним періодом роботи (забезпечення електричною енергією літніх будинків, готелів та ін.), то загальноприйняті методики [1] не дають змоги розрахувати оптимальний кут нахилу для сезонних періодів роботи.

Для визначення оптимального кута нахилу ФП був запропонований аналітичний метод [2], що дозволяє розрахувати оптимальний кут нахи-

лу ФП із використанням усереднених даних багаторічних метеорологічних спостережень для певної місцевості та довільного періоду роботи. Даний метод визначає оптимальний кут нахилу β із умови максимізації приходу повної сонячної радіації $E_{total,t}$ на поверхню ФП:

$$\frac{\partial E_{total,t}}{\partial \beta} = 0. \quad (1)$$

Згідно (1) величина повної сонячної радіації, що складається із прямої, дифузної та відбитої компонент, вимагає визначення. Визначення дифузної компоненти радіації передбачає використання моделей, які поділяються на два типи: ізотропні та анізотропні. Ізотропні моделі припускають, що інтенсивність дифузної сонячної радіації однакова у всіх точках небосхилу. Анізотропні – навпаки, розглядають неоднорідність інтенсивності сонячної радіації, наприклад, у зоні горизонту або навколосонячному просторі. Розроблений нами [2] аналітичний метод визначення оптимального кута нахилу ФП був використаний із застосуванням ізотропної моделі Ліу-Джордана [3] і анізотропних моделей Хея [4], Хея-Девіса [5], Ключера [6] і Рейндла [7].

Згідно моделі Ліу-Джордана [3] дифузний компонента радіації вважається однорідною і не залежить від розташування сприймаючої поверхні, а лише від площі небосхилу, що проглядається з точки встановлення ФП. Кутовий фактор R_D

для дифузного випромінювання у рамках даної моделі дорівнює:

$$R_D = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta), \quad (2)$$

а інтенсивність дифузного випромінювання $I_{DT}^{Liu-Jord}$ становить:

$$I_{DT}^{Liu-Jord} = I_{DH} \frac{1 + \cos \beta}{2}. \quad (3)$$

Дифузна радіація на горизонтальну поверхню I_{DH} може бути отримана шляхом усереднення даних метеорологічних спостережень за тривалий період часу (10 років і більше). Загалом повна радіація на нахилену поверхню за моделлю Ліу-Джордана описується рівнянням:

$$E_{total,T} = I_{BH} \frac{\cos \theta}{\cos \varphi} + (I_{BH} + I_{DH}) \frac{1 - \cos \beta}{2} + I_{DH} \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (4)$$

де I_{BH} – інтенсивність прямої радіації на горизонтальну поверхню; θ – кут падіння сонячних променів; φ – зенітний кут Сонця.

Модель Хея-Девіса [5] враховує ізотропну складову дифузного випромінювання і компоненту, яка створюється сяянням навколосонячної ділянки небосхилу і направлена у напрямку від Сонця. Співвідношення цих компонент визначається коефіцієнтом анізотропії – співвідношенням інтенсивності прямого випромінювання на площадку, нормальну до напрямку променів на поверхні землі I_{BN} , до інтенсивності випромінювання на таку ж нормальну площадку на верхній межі атмосфери I_{0N} :

$$A = \frac{I_{BN}}{I_{0N}}. \quad (5)$$

Коефіцієнт транспозиції згідно моделі Хея-Девіса має вигляд:

$$R_D = AR_B + (1 - A) \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (6)$$

де R_B – коефіцієнт транспозиції для прямої радіації.

Модель Хея-Девіса існує поряд із моделлю Хея [4], яка відрізняється від першої визначенням коефіцієнта анізотропії (замість інтенсивності на

нормальну поверхню використовується відповідна інтенсивність на горизонтальну площадку):

$$A = \frac{I_{BH}}{I_0}. \quad (7)$$

Рейндл доповнив модель Хея-Девіса доданком, що відповідає за випромінювання сяяння поблизу горизонту:

$$(1 - A) \frac{1 + \cos \beta}{2} \alpha \sin^3 \frac{\beta}{2}, \quad (8)$$

значення якого залежить від рівня хмарності за рахунок коефіцієнта α :

$$\alpha = \sqrt{\frac{I_B}{I_B + I_D}}, \quad (9)$$

який зменшується при збільшенні густини хмарного покриву. Коефіцієнт транспозиції для моделі Рейндла можна виразити наступним чином:

$$R_D = AR_B + (1 - A) \frac{1 + \cos \beta}{2} \left(1 + \alpha \sin^3 \frac{\beta}{2} \right). \quad (10)$$

Модель Ключера [6] характеризується введенням функції хмарності F . Інтенсивність дифузної радіації згідно даної моделі складає:

$$I_{DT} = \frac{1}{2} I_{DH} (1 + \cos \beta) M_3 M_4, \quad \text{де} \quad (11)$$

$$M_3 = 1 + F \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right), \quad (12)$$

$$M_4 = 1 - F \cos^2 \theta \sin^3 \varphi, \quad (13)$$

$$F = 1 - \left(\frac{I_{DH}}{I_{total,T}} \right)^2, \quad (14)$$

де $I_{total,T}$ – інтенсивність повної радіації на нахилену поверхню.

Таким чином, коефіцієнт F при повністю захмареному небосхилі ($I_{DH} = I_{total,T}$) зменшується до нуля, і дана модель перетворюється на модель Ліу-Джордана. Коефіцієнт транспозиції для моделі Ключера [7] становить:

$$R_D = \frac{1 + \cos \beta}{2} \left(1 + F \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \times (1 - F \cos^2 \theta \sin^3 \varphi). \quad (15)$$

В даній роботі були визначені оптимальні кути нахилу ФП для Києва у випадках різних робочих періодів роботи ФЕС. Вхідні дані про сонячну радіацію і альbedo земної поверхні були взяті з довідника багаторічних метеорологічних

спостережень [8]. Оптимальні кути нахилу ФП були визначені із застосуванням різних моделей сонячної радіації і для різних періодів роботи ФЕС тривалістю від 3 до 12 місяців. Результати проведених розрахунків показані у таблиці 1.

Таблиця 1. Результати розрахунку оптимального кута нахилу ФП для Києва

Розташування	Робочий період, місяці	Оптимальний кут нахилу ФП β , град.				
		Модель Ліу-Джордана (ізотропна)	Модель Хея	Модель Хея-Девіса	Модель Рейндла	Модель Ключера
Київ	1-12	34,67	38,00	37,92	38,64	36,53
	3-11	32,13	33,99	34,00	34,26	32,21
	4-10	30,31	30,88	30,91	30,79	28,74
	5-9	27,95	27,52	27,58	26,89	24,77
	6-8 (літо)	25,53	24,22	24,22	23,19	21,10

Висновки. Аналіз отриманих значень оптимальних кутів нахилу ФП показав, що використання анізотропних моделей приводить до збільшення значення кута нахилу в порівнянні з використанням ізотропної моделі. Для періодів роботи, що включають зимові місяці, середня різниця складає 8-13 градусів, а для літніх періодів 1-2 градуси. Загалом величина різниці між значенням оптимального кута для ізотропної моделі та анізотропної залежить не тільки від типу застосованої анізотропної моделі, але й від місцевості, для якої проводився розрахунок.

REFERENCES

1. Даффи Д. А., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии // Москва : Мир, 1977. 420 с.
2. Гаевский А.Ю., Ушкаленко О.В. Определение оптимальных углов наклона фотоэлектрических панелей // Відроджувана енергетика. – 2016, №1 (44), с. 21-27.
3. Liu B. Y. H., Jordan R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation // Solar Energy. – 1960. – no. 3. – vol. 4. – pp. 1–19.
4. Hay J. E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces // Solar Energy, vol. 23, no.4, pp. 301–307, 1979.
5. Hay J.E., Davies J.A. Calculation of Solar Radiation Incident on an Incline Surface // First Canadian Solar Radiation Data Workshop. – April 17-19, 1978. – Toronto, Ontario, Canada, Ministry of Supply and Services, Canada.
6. Reindl D. T., Beckman W. A., Duffie J. A. Diffuse fraction correlations // Solar Energy. – 1990. – no. 1. – vol. 45. – pp. 1–7.
7. Klucher T.M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces // Solar Energy. – 1979. – no. 23. – pp. 111–114.
8. Справочник по климату СССР. Украинская ССР. Часть I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние // Ленинград : Гидрометеорологическое изд. – 1966. – 126 с.

1. Daffi D.A., Bekman U.A. Thermal processes based on solar energy utilization. – M: Mir, 1977. – 420 p. (Rus)
2. Gajewski A.Yu., Ushkalenko O.V. Determination of the optimal inclination angles for PV panels // Vidnovlyuvana energetika. – 2016. – №1 (44). – Pp. 21–27. (Rus)
3. Liu B.Y.H., Jordan R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation // Solar Energy. – 1960. – No. 3. – Vol. 4. – Pp. 1–19. (Eng)
4. Hay J.E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces // Solar Energy. – 1979. – Vol. 23. – No.4. – Pp. 301–307. (Eng)
5. Hay J.E., Davies J.A. Calculation of Solar Radiation Incident on an Incline Surface // First Canadian Solar Radiation Data Workshop. – April 17-19, 1978. – Toronto, Ontario, Canada, Ministry of Supply and Services, Canada. (Eng)
6. Reindl D.T., Beckman W.A., Duffie J.A. Diffuse fraction correlations // Solar Energy. – 1990. – No. 1. – Vol. 45. – Pp. 1–7. (Eng)
7. Klucher T.M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces // Solar Energy. – 1979. – No. 23. – Pp. 111–114. (Eng)
8. Solar radiation, radiation balance and sunshine / Climate directory in USSR. Ukraynskaia SSR. Part I. – L.: Gidrometeorologicheskoe izd. – 1966. – 126 p.

О.В.Ушкаленко (Национальный Технический Университет Украины "КПИ", Киев)

Определение оптимального угла наклона фотоэлектрических панелей с учетом анизотропии солнечной радиации

В данной статье проводится сравнение значений оптимальных углов наклона фотоэлектрических панелей, найденных аналитическим путем из условия максимизации прихода солнечной радиации на принимающую поверхность фотоэлектрической панели. Оптимальные значения углов наклона были найдены с использованием разных моделей солнечной

радиации: изотропной и анизотропных, а также разных периодов работы фотоэлектрической станции. Входными данными для расчетов оптимальных углов наклона, которые приведены в данной статье, являются усредненные данные многолетних метеорологических наблюдений для городов Украины. Библ. 8, табл. 1.

Ключевые слова: оптимальный угол наклона, фотоэлектрические панели, солнечная радиация, анизотропные модели.

Ushkalenko O.V. (National Technical University of Ukraine "KPI", Kyiv)

Determination of optimum tilt angle for PV panels considering solar radiation anisotropy

In the current article the reader can find comparison of the photovoltaic panels optimal tilt angles that were found by analytical method, which uses condition of incident solar radiation maximization. Optimal values of tilt angles were calculated with usage of different solar models, isotropic and anisotropic as well. Also optimal tilt angles were found for different photovoltaic panels working periods. Mean meteorological data of many years observations were used as input data. References 8, table 1.

Keywords: optimal tilt angle, photovoltaic panels, solar radiation, anisotropic models.

SYNOPSIS

Photovoltaic (PV) plant should use solar radiation as much effective as possible. This case depends on structural parameters, profiles of load and radiation, PV panels tilt angle and orientation, equipment parameters. Tilt angle and orientation can be changed in the most easy way in the opposite to other factors.

Solar radiation profile is the key parameter in PV panel tilt angle calculation, it can be obtained by direct measurements or using solar radiation models. At present solar radiation models can be distinguished by radiation uniformity: isotropic and anisotropic. The most widely used isotropic model is Liu-Jordan model. As for anisotropic models, there are a lot of such kind models.

In present article reader can find review of the most optimal photovoltaic panels tilt angle for Kyiv. These tilt angles values were found with usage of different types of solar radiation models, isotropic and anisotropic as well. At the final of article reader can find comparison table with tilt angles calculated using different models of solar radiation.

Стаття надійшла до редакції 08.07.16

Остаточна версія 02.09.16

МІЖНАРОДНИЙ ІНВЕСТИЦІЙНИЙ БІЗНЕС-ФОРУМ З ПИТАНЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

ІХ МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА - 2016

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ

8-10
листопада



МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР

Україна, Київ, Броварський пр-т, 15

М "Лівобережна"

☎ +38 044 201-11-66, 206-87-86

e-mail: energo@iec-expo.com.ua

www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

Технічний партнер: *RentMedia*

ОРГАНІЗАТОР:

Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України

СПІВОРГАНІЗАТОР:

Міжнародний виставковий центр

ГАЛУЗЕВИЙ ПАРТНЕР:

Українська Вітроенергетична Асоціація