

УДК 620.92:551.521.37

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СТЕЖЕННЯ ЗА СОНЦЕМ ОДНОВІСНИМИ ПОВОРОТНИМИ ПРИСТРОЯМИ

Отримано 30 трав. 2022; рекомендовано до публікації 6 черв. 2022
Доступно онлайн 30 черв. 2022

**С. В. Сиротюк¹, В. П. Гальчак², В. М. Боярчук³,
С. В. Коробка⁴, В. М. Сиротюк⁵**

Автор для кореспонденції: Сергій Сиротюк
e-mail: ssyr@ukr.net

Наведені у літературі оцінки ефективності сонячних установок у режимі стеження за Сонцем часто неоднозначні внаслідок неідентичних критеріїв порівняння та умов опромінення. Цю характеристику пропонується оцінювати системно за двома показниками – орієнтаційним та енергетичним. Перший чисельно рівний поточному значенню косинуса кута освітлення сприймальної поверхні, а другий – денній експозиції стежної поверхні, віднесеної до максимального значення при стеженні за Сонцем двовісним поворотним пристроєм. Обидва показники розраховані у припущенні опромінення трьома потоками сонячної енергії при ясному небі, які змінюються протягом дня відповідно до моделі Європейського Атласу сонячної радіації (ESRA).

Просторово-часові параметри інсоляції поверхні стеження визначені для майданчика на широті 50° у найдовший день літнього сонцестояння. Обмеження, накладені орієнтацією осі обертання, наочно ілюстровані просторовими схемами освітлення поверхні стеження чотирьох типів одновісних поворотних пристроїв. За ними зручніше простежити аналітичний зв'язок кутових переміщень Сонця і нормалі поверхні стеження для забезпечення режиму максимальної поточної освітленості.

Співвідношення між потоками сонячної радіації при різних станах атмосфери враховані фактором каламутності Лінке. За одиницю порівняння ефективності одновісного стеження приймається денна експозиція поверхні пристрою двовісного стеження, кут освітлення якої протягом дня рівний нулю. Розглядаються чотири варіанти оцінки ефективності відносно прямого і повного потоків сонячної радіації при двох варіантах розподілу яскравості неба – ізотропного та неізотропного у наближенні моделі Hay-Davies. Результати моделювання представлені у табличній і графічній формах. Бібл. 13, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: сонячна енергія, трекер, моделювання, освітленість, експозиція, ефективність.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF SOLAR TRACKING WITH UNIAXIAL TRACKING DEVICE

Received 30 May 2022; accepted 6 June 2022.
Available online 30 June 2022

**S. Syrotyuk¹, V. Halchak², V. Boyarchuk³,
S. Korobka⁴, V. Syrotyuk⁵**

Author for correspondence: Serhiy Syrotyuk
e-mail: ssyr@ukr.net

Estimates of the efficiency of solar installations in the Sun tracking mode presented in the literature are often ambiguous due to non-identical comparison criteria and irradiation conditions. It is pro-

¹ канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри енергетики Львівського національного аграрного університету <https://orcid.org/0000-0001-9966-6299>

² канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри енергетики Львівського національного аграрного університету <https://orcid.org/0000-0002-6831-8344>

³ канд. техн. наук, перший проректор, професор кафедри енергетики Львівського національного аграрного університету <https://orcid.org/0000-0001-8294-8759>

⁴ канд. техн. наук, доцент кафедри енергетики Львівського національного аграрного університету <https://orcid.org/0000-0002-4717-509X>

⁵ канд. техн. наук, професор кафедри електротехнічних систем Львівського національного аграрного університету <https://orcid.org/0000-0003-4525-9801>

¹ doc., CScTech, Associate Professor, Head of the Department of Power Engineering of Lviv National Agrarian University <https://orcid.org/0000-0001-9966-6299>

² doc., CScTech, Associate Professor of the Department of Energy of Lviv National Agrarian University <https://orcid.org/0000-0002-6831-8344>

posed to evaluate this characteristic systematically by two indicators - orientation and energy. The first is numerically equal to the current value of the cosine of the illumination angle of the receiving surface. And the second - the daily exposure of the tracking surface, attributed to the maximum value with ideal tracking of the Sun by a biaxial rotary device. Both indicators are calculated under the assumption of irradiation with three streams of solar energy in clear skies, which change during the day according to the model of the European Solar Radiation Atlas (ESRA).

Spatially temporal parameters of insolation of the tracking surface are determined for the site at latitudes of 50° and the longest day of the summer solstice. The limitations imposed by the orientation of the axis of rotation are clearly illustrated by spatial schemes of illumination of the tracking surface of 4 types of uniaxial rotary devices. They are easier to track the analytical relationship between the angular displacements of the Sun and the normal of the tracking surface to ensure maximum current illumination.

The relationships between the fluxes of solar radiation at different atmospheric states are taken into account by the Linke turbidity factor. The unit of comparison of the efficiency of uniaxial tracking is the daily exposure of the surface the biaxial tracking device, the angle of illumination of which during the day is zero. Four variants of estimation of efficiency concerning direct and full streams of solar radiation at two variants of distribution of brightness of the sky - isotropic and non-isotropic in the Hay-Davies model approximation are considered. The simulation results are presented in tabular and graphical forms.

Ref. 13, Tab. 1, Fig. 7.

Keywords: solar energy, tracker, modeling, illumination, exposure, efficiency.

Перелік використаних скорочень та позначень:

AM – атмосферна маса

ESRA – Європейський Атлас сонячної радіації

A_0, A_1, A_2 – коефіцієнти функції просторового розподілу дифузного потоку

F_d – множник, який відображає просторовий розподіл дифузного потоку

G_{sn} – інтенсивність сонячної енергії на вході в атмосферу станом на поточний день року n

G_b – інтенсивність наземного прямого потоку сонячної радіації

G_{bh}, G_{dh}, G_{th} – прямий, дифузний і відбитий потоки сонячної радіації до горизонтальної поверхні

G_{th} – сумарний потік сонячної радіації до горизонтальної поверхні

$G_{b\beta}, G_{d\beta}, G_{p\beta}$ – прямий, дифузний і відбитий потоки сонячної радіації до нахиленої поверхні

$G_{t\beta}$ – сумарний потік сонячної радіації до нахиленої поверхні

H – енергетична експозиція

$H_{t\beta}$ – сумарна експозиція нахиленої поверхні, усіма потоками сонячної радіації

H_{tn} – сумарна експозиція поверхні, нормальної до прямого потоку сонячних променів

HEW – горизонтальна вісь обертання "схід-захід" (Horizontal east-west axis tracker)

HNS – горизонтальна вісь обертання "північ-південь" (Horizontal north-south axis tracker)

m – відносна оптична маса атмосфери

³ prof., CScTech, First vice-rector, Professor of the Department of Energy of Lviv National Agrarian University <https://orcid.org/0000-0001-8294-8759>

⁴ doc., CScTech, Associate Professor of the Department of Power Engineering of Lviv National Agrarian University <https://orcid.org/0000-0002-4717-509X>

⁵ Kielce University of Technology Kielce, Poland <https://orcid.org/0000-0003-4525-9801>

VA – вертикальна вісь обертання (Vertical axis tracker)

PA – полярна вісь обертання навколо (Polar axis tracker)

T_L, T_{LK} – фактор каламутності атмосфери Лінке і Лінке-Кастена

$T_{LK}(AM2)$ – стандартне значенні фактора каламутності, при $AM = 2$

T_{rd} – передавальна функція від атмосферної маси до інтенсивності потоку сонячної радіації

z – висота над рівнем моря

A_i – індекс анізотропії – частка дифузного потоку від навколосонячного ореола

A_{cx} – азимут сходу

A_{zx} – азимут заходу

Ізотр. – ізотропний розподіл радіаційних потоків

Аніз. – анізотропний розподіл радіаційних потоків

β – кут нахилу поверхні до площин горизонту

γ – азимут поверхні стеження

γ_s – азимут Сонця

δ – сонячне схилання

$\delta_R(m)$ – оптична товщина релєївської атмосфери

$\eta_{ef}(\tau)$ – поточна ефективність стеження

$\eta_{ef}(H)$ – експозиційна ефективність стеження

$\eta(H_{b\beta}), \eta(H_{t\beta})$ – експозиційна ефективність нахиленої поверхні при освітлення прямим і повним потоками сонячної радіації

θ – кут падіння сонячних променів (кут освітлення поверхні)

θ_z – зенітний кут

ρ – густина повітря

τ – сонячний час з відліком від моменту полудня

τ_{NS} – момент переходу Сонця з північної півсфери у південну і назад

τ_{cx}, τ_{zx} – моменти природного сходу і заходу Сонця

ϕ – географічна широта місцевості

ω – кутова швидкість обертання Землі навколо власної осі

ω_s – годинний кут

Вступ. Відновлювана енергетика у найближчій перспективі може стати основою тепло- та електроенергетики як альтернатива установкам, які використовують викопні палива. Екологізація енергетики є одним із визначальних рушіїв розвитку відновлюваної енергетики і сьогодні на неї припадає майже четвертина загального споживання енергії [1]. Інтенсивний розвиток демонструє сонячна, як тепло-, так і електроенергетика, який можна простежити за обсягами встановленої потужності сонячних енергоустановок. Так, впродовж 2020 року було введено в експлуатацію 139 ГВт сонячних фотоелектричних установок, а їх загальна встановлена потужність на кінець року склала 760 ГВт [1]. Водночас інтенсивно розвиваються технології з підвищення їх продуктивності: наприклад порівняно низьку ефективність фотоелектричного перетворення (близько 20 %) доповнюють стеженням за Сонцем. Тому питання розробки, використання та аналізу ефективності сонячних трекерів з різними осями поворотних пристроїв залишаються актуальними з стаціонарною сприймальною поверхнею [2–4]. Такі оцінки неповні без уточнення внесків непрямих потоків сонячної радіації в енергетичну освітленість поверхні. Останні найпростіше оцінювати безпосереднім вимірюванням за однакових умов інсоляції або моделюванням потоків сонячної радіації з просторово-часовим розподілом, близьким до реальної атмосфери. Але поодинокі приклади моделювання освітленості фотоелектричних панелей, наведені у монографії [5], не доведено до оцінки ефективності одновісних пристроїв стеження у порівнянні з досконалими двовісними. Так, графічні результати моделювання освітленості поверхні стеження, наведені в публікації [4], відповідають тільки умовам інсоляції пустельного регіону тропічних широт. Натомість у помірних широтах методика оцінки ефективності різних пристроїв стеження повинна передбачати можливість істотних відхилень від усереднених співвідношень між потоками сонячної радіації. Таким вимогам відповідає модель сонячної радіації ESRA (European Solar Radiation Atlas) [6–8], у якій зміни прозорості атмосфери враховують фактором каламутності атмосфери Лінке.

Результати дослідження. Як відомо, ефективність використання потенціалу сонячної енергії оцінюють за рівнем поточної освітленості сприймальної поверхні, або кількістю енергії, яка надходить на освітлену поверхню за певний часовий інтервал, – енергетичною експозицією H . Поверхня стеження, з довільним кутом нахилу β до площини горизонту, протягом дня одночасно опромінюється змінними у часі прямим $G_{b\beta}$, дифузним $G_{d\beta}$ і відбитим $G_{p\beta}$ потоками сонячної радіації, а загальна освітленість дорівнює їх сумі:

$$G_{t\beta} = G_{b\beta} + G_{d\beta} + G_{p\beta}. \quad (1)$$

Тому ефективність стеження доцільно поділяти на поточну (орієнтаційну) $\eta_{ef}(\tau)$ та енергетичну (експозиційну) η_{ef}

(H), значення яких зручно оцінювати відносно максимальних для поверхні, перпендикулярної до прямих сонячних променів:

$$\eta_{ef}(\tau) = \frac{G_{t\beta}(\tau)}{G_m(\tau)}; \quad \eta_{ef}(H) = \frac{H_{t\beta}}{H_m}. \quad (2)$$

В ідеальному випадку дуже чистої атмосфери, наприклад у високогір'ї, коли непрямими потоками можна знехтувати, орієнтаційна ефективність дорівнює косинусу кута освітлення θ :

$$\eta_0 = G_{b\beta} / G_{b\beta n} = \cos\theta. \quad (3)$$

При використанні радіаційної моделі ESRA поточну інтенсивність прямого потоку сонячних променів узалежнюють через проміжні величини: зенітний кут θ_z , відносну атмосферну масу m (інше позначення AM), її релєвську оптичну товщину δ_R , показник каламутності – фактор Лінке – Кастена T_{LK} і з урахуванням висоти майданчика над рівнем моря z :

$$G_b = G_{sn} e^{-0,8662 \cdot m \cdot \delta_R(m) \cdot T_{LK}(AM^2)}, \quad (4)$$

$$m = \frac{\exp\left(-\frac{z}{8334,5}\right)}{\cos\theta_z + 0,50572 \times (96,07995 - \theta_z)^{-1,6354}}, \quad (5)$$

$$\delta_R(m) = 1 / (6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4), \quad (6a)$$

при $m < 20$ і $h > 1,9^\circ$ та

$$\delta_R(m) = 1 / (10,4 + 0,718m), \quad \text{при } m > 20,7. \quad (6b)$$

Інтенсивність дифузного потоку до горизонтальної поверхні узалежнюють від інтенсивності прямих сонячних променів на вході у земну атмосферу G_{sn} за таким співвідношенням

$$G_{dh} = G_{sn} T_{rd} [T_{LK}(AM^2)] F_d [\theta_z, T_{LK}(AM^2)], \quad (7)$$

де, $T_{LK}(AM^2)$ – стандартне значення фактора каламутності Лінке – Кастена, при $AM = 2$; T_{rd} – функція перетворення, визначена за співвідношенням (8):

$$T_{rd} [T_{LK}(AM^2)] = -1,5843 \cdot 10^{-2} + 3,0543 \cdot 10^{-2} T_{LK}(AM^2) + 3,797 \cdot 10^{-4} [T_{LK}(AM^2)]^2. \quad (8)$$

У середніх широтах фактор Лінке – Кастена найменший взимку ($T_{LK} \approx 2,5$) і найбільший влітку ($T_{LK} \approx 4,0$) [8].

Просторовий розподіл дифузного потоку визначає множник F_d , узалежнений від зенітного відхилення і каламутності атмосфери [6, 7] такими співвідношеннями:

$$F_d[\theta_z, T_L(AM2)] = A_0 + A_1 \cos \theta_z + A_2 \cos^2 \theta_z, \quad (9)$$

$$A_0 = 2,6463 \cdot 10^{-1} - 6,1581 \cdot 10^{-2} T_L(AM2) + 3,1408 \cdot 10^{-3} [T_L(AM2)]^2, \quad (10)$$

$$A_1 = 2,0402 + 1,8945 \cdot 10^{-2} T_L(AM2) - 1,1161 \cdot 10^{-2} [T_L(AM2)]^2, \quad (11)$$

$$A_2 = -1,3025 + 3,9231 \cdot 10^{-2} T_L(AM2) + 8,5079 \cdot 10^{-3} [T_L(AM2)]^2. \quad (12)$$

Якщо припустити рівномірну (ізотропну) яскравість неба [10, 11], сумарний потік сонячної радіації до нахиленої поверхні рівний сумі прямого, дифузного і відбитого (з коефіцієнтом відбивання ρ) потоків сонячної радіації:

$$G_{\text{ф}} = G_b + G_{\text{дн}} \frac{1 + \cos \beta}{2} + G_{\text{тн}} \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}. \quad (13)$$

У найпростішій моделі нерівномірної (анізотропної) яскравості неба Hay-Davies частку дифузного потоку від навколосонячного ореола (circumsolar) враховують індексом анізотропії $A_i = G_b/G_{\text{сн}}$, рівним відношенню інтенсивності приземного і позаатмосферного променів:

$$G_{\text{ф}} = (G_{\text{бн}} + A_i G_{\text{дн}}) \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + G_{\text{дн}} (1 - A_i) \frac{1 + \cos \beta}{2} + G_{\text{тн}} \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}. \quad (14)$$

Кути нахилу $\beta(\tau)$ і освітлення $\theta(\tau)$ поверхні стеження змінюються протягом дня залежно від конструкції одновісного пристрою, який обертає стежну поверхню навколо:

- горизонтальної осі "схід-захід" (Horizontal east–west axis tracker – HEW);
- горизонтальної осі "північ-південь" (Horizontal north–south axis tracker – HNS);
- вертикальної осі (Vertical axis tracker – VA);
- полярної осі, яка паралельна земній (Polar axis tracker – PA).

Максимальна освітленість поверхні відповідає мінімальному відхиленню її нормалі n від напрямку на Сонце. Обидва вектори задають їх проекціями у горизонтальній та екваторіальній системах небесних координат [11, 12], основи яких взаємно перетинаються по лінії схід-захід на кут $90^\circ - \varphi$. (рис. 1). Поверхня стеження розміщена у спільному центрі обох координатних систем, а її просторову орієнтацію визначають двома кутами: нахилу β і азимутом γ , рівним відхиленню горизонтальної проекції нормалі від меридіану. Натомість координати Сонця у цій системі задають зенітним кутом θ_z і азимутом γ_s . Обидва азимути при відхиленні на схід від'ємні, а на захід – додатні.

В екваторіальній системі координатами Сонця є кут схилення δ (влітку додатний, а взимку від'ємний) і годинний кут $\omega_s = \omega\tau$, де $\omega = 15$ град/год – кутова швидкість Сонця навколо полярної осі. Годинний кут, так само як і сонячний час τ , до полудня від'ємний, а пополудні – додатний. Верхня (літня) і нижня (зимова) сонячні траєкторії відповідають літньому і зимовому сонцестоянню відповідно, середня – весняному і осінньому рівноденню, а точки їх перетину з лінією горизонту – азимутам природного сходу

ду $A_{\text{сх}}$ і заходу $A_{\text{зх}}$ Сонця. Натомість інсоляція поверхні починається з моменту сходу Сонця над нею – у точці D перетину її площини з сонячною траєкторією.

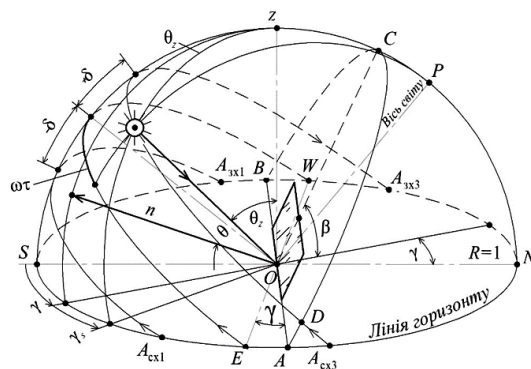


Рис. 1. Схема освітлення Сонцем поверхні довільної орієнтації

Fig. 1. Scheme of Sun illumination of the surface of arbitrary orientation

Кут освітлення поверхні довільної орієнтації прямими сонячними променями пов'язаний з параметрами обох координатних систем відомою формулою сферичної астрономії [12, 13]:

$$\cos \theta = (\sin \varphi \cdot \cos \beta - \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma) \cdot \sin \delta + (\sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \tau + \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \tau + \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega \tau) \cdot \cos \delta. \quad (15)$$

Параметри γ_s , θ_z , β , γ горизонтальної системи координат і δ , $\omega \tau$ – екваторіальної пов'язані між собою такими співвідношеннями:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \tau; \quad (16)$$

$$\sin \theta_z \sin \gamma_s = \cos \delta \cdot \sin \omega \tau; \quad (17)$$

$$\sin \delta = \cos \theta_z \cdot \sin \varphi - \sin \theta_z \cdot \cos \varphi \cdot \cos \gamma_s. \quad (18)$$

З їх врахуванням загальна формула (15) зводиться до компактнішого вигляду:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta + \sin \theta_z \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma). \quad (19)$$

Поточним азимутам Сонця, які перевищують $\pm 90^\circ$, відповідають від'ємні значення їх косинуса:

$$\cos \gamma_s(\tau) = \left(\frac{\cos \theta_z(\tau) \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z(\tau) \cos \varphi} \right). \quad (20)$$

Розв'язкам цього рівняння при $\theta_z = \pm 90^\circ$ відповідають азимути сходу і заходу Сонця:

$$A_{\text{зх}} = -A_{\text{сх}} = \arccos \left(-\frac{\sin \delta}{\cos \varphi} \right). \quad (21)$$

Моментам переходу Сонця з північної півсфери у південну і назад $\tau_{\text{НС}}$ відповідають такі параметри: азимут $\gamma_s = \pm 90^\circ$, чисельник формули (20) рівний нулю і значення $\cos \theta_z = \sin \delta / \sin \varphi$. Підстановкою останнього у формулу (16) отримують

$$\tau_{NS} = \tau|_{\gamma_s = \pm 90^\circ} = \frac{1}{\omega} \cdot \arccos\left(-\frac{\operatorname{tg}\delta}{\operatorname{tg}\varphi}\right) \quad (22)$$

Натомість зі співвідношення (20) при $\theta_z = 90^\circ$ визначають моменти природного сходу τ_{cx} і заходу τ_{zx} Сонця відносно горизонту:

$$\tau_{zx} = -\tau_{cx} = \frac{1}{\omega} \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (23)$$

Відомі з літератури аналітичні залежності параметрів освітлення поверхні стеження безпосередньо впливають з наведених нижче геометричних побудов і графічних залежностей. За ними зручно обґрунтовувати добові та сезонні обмеження, які накладає орієнтація осі обертання. Так, наведена на рис. 2, а схема освітлення поворотної поверхні відповідає пристрою з горизонтальною віссю обертання, паралельною напрямку "схід-захід" (HEW axis tracker). Згідно з побудовою, очевидними є такі проміжні співвідношення: $AC = \sinh = \cos\theta_z$; $AO = \sin\theta_z$; $AB = AO \cos\gamma_s = \sin\theta_z \cdot \cos\gamma_s$; $\operatorname{tg}\beta = AB/AC$. Звідки точний кут нахилу стежної поверхні

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \theta_z \cos \gamma_s. \quad (24)$$

Враховуючи, що при $OC = 1$, $\sin\theta = OB/OC = AO \cdot \sin\gamma_s = \sin\theta_z \sin\gamma_s$, кут освітлення рівний:

$$\cos\theta = (1 - \sin^2\theta_z \sin^2\gamma_s)^{1/2}. \quad (25)$$

Відповідні цьому рівнянню часові залежності наведені на рис. 2, б, де зміни нахилу $\beta(t)$ і $\cos\theta(t)$ у літній період відбуваються у моменти τ_{NS} переходу Сонця з північної півсфери неба у південну і назад через лінію "схід-захід".

Схема освітлення поверхні пристрою з горизонтальною віссю обертання вздовж напрямку "північ-південь" (HNS axis tracker) наведена на рис. 3, а.

Максимум освітленості реалізується за очевидної умови, що нормаль поверхні n , промінь Сонця CO та вісь обертання одночасно перебувають у площині півкола SCN . Тоді кут нахилу поверхні β можна отримати з очевидних співвідношень для прямокутних трикутників ABC і AOC : $\operatorname{tg}\beta = AB/AC$ та умови рівності векторів

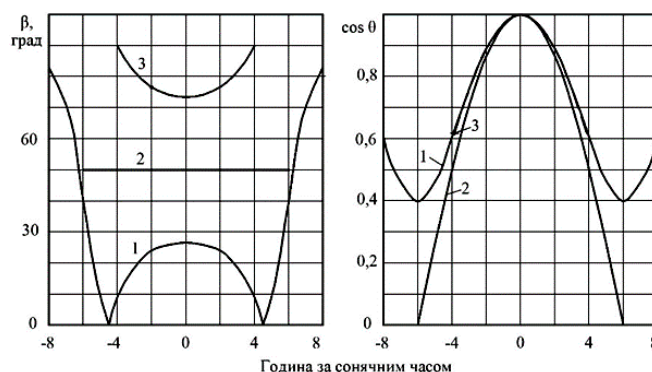
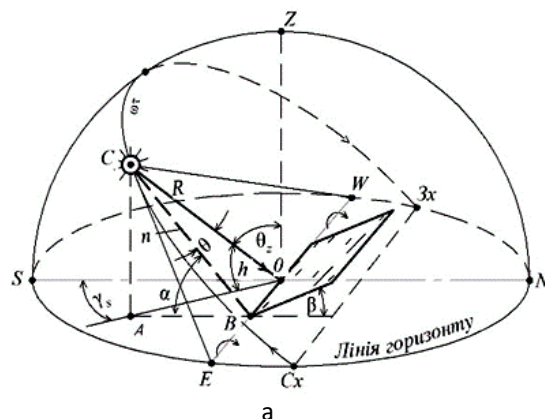


Рис. 2. Схема освітлення площини при її обертанні навколо горизонтальної осі "схід-захід" (HEW axis tracker) (а) та її кутові параметри (б) у періоді: 1 – літнього сонцестояння; 2 – рівнодення; 3 – зимового сонцестояння

Fig. 2. Scheme of illumination of the plane during its rotation around the horizontal axis "east-west" (HEW axis tracker) (a) and its angular parameters (b) in the periods: 1 – summer solstice; 2 – equinox; 3 – winter solstice

$|n| = |R| = 1$: $AO = \sin\theta_z$; $AB = \sin\theta_z \cdot \sin\gamma_s$; $AO/AC = \operatorname{tg}\theta_z$; $AC = \cos\theta_z$, звідки $\operatorname{tg}\beta = \operatorname{tg}\theta_z \cdot \sin\gamma_s$. Але для збереження сталого позитивного значення кута нахилу при полудневому переході Сонця зі східної частини півсфери у західну та одночасній зміні знаку азимута поверхні сте-

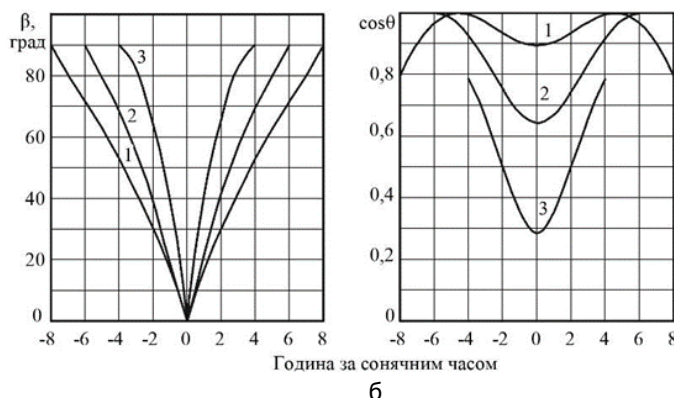
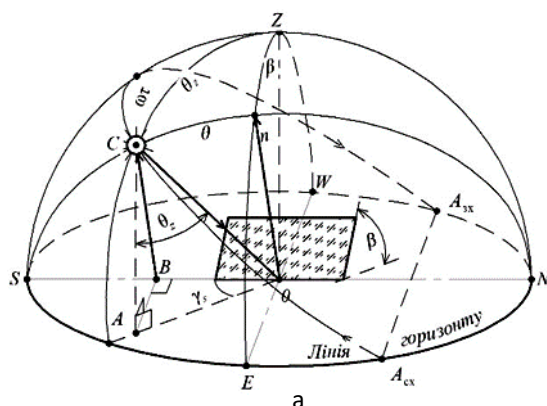


Рис. 3. Схема для визначення параметрів освітлення площини при її обертанні навколо горизонтальної осі "північ-південь" (HNS axis tracker) (а) та орієнтаційні параметри її інсоляції протягом дня (б): 1 – літнього сонцестояння; 2 – весняного рівнодення; 3 – зимового сонцестояння

Fig. 3. Scheme for determining the lighting parameters of the plane during its rotation around the horizontal axis "north-south" (HNS axis tracker) (a) and the orientation parameters of its insolation during the day (b): 1 – summer solstice; 2 – spring equinox; 3 – winter solstice

ження з $\gamma = -90^\circ$ зранку ($\gamma_s \leq 0$) на $\gamma = +90^\circ$ пополудні ($\gamma_s > 0$) доцільніше перейти до парної функції з аргументом, рівним різниці азимутів ($\gamma - \gamma_s$):

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \theta_z \cos(\gamma - \gamma_s). \quad (26)$$

Кут освітлення визначається з прямокутного трикутника ODC , де $\angle D$ прямий: $\cos \theta = DC/R = DC$; $DC^2 = BD^2 + BC^2$; $BC/OC = \cos \theta_z$; $OB/OC = \sin \theta_z$; $BD = OB \sin \gamma_s = \sin \theta_z \cdot \sin \gamma_s$. Відтак або

$$\begin{aligned} \cos q &= \sqrt{\cos^2 q_e + \sin^2 q_e \cdot \sin^2 \gamma_s} \\ \cos q &= \sqrt{\cos^2 q_e + \cos^2 \delta \sin^2 \omega t} \end{aligned} \quad (27)$$

Залежності $\beta(t)$ і $\cos \theta(t)$ для цього пристрою наведені на рис. 3, б. А на рис. 4 порівнюється енергетична освітленість обох поверхонь стеження прямими сонячними променями, де тонкими обвідними лініями позначено освітленість поверхні двокоординатного пристрою, чисельно рівної інтенсивності прямого потоку $G_b(t)$.

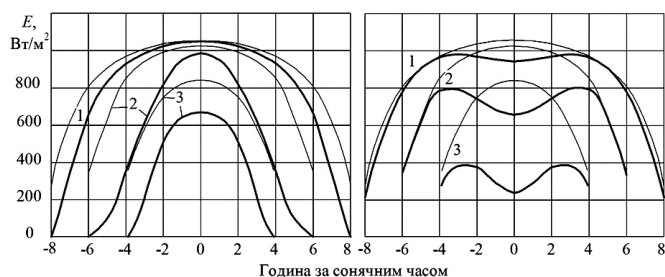


Рис. 4. Енергетична освітленість поверхні горизонтально-осьового HEW (а) і HNS (б) стеження протягом дня: 1 – літнього сонцестояння; 2 – весняного рівнодення; 3 – зимового сонцестояння. Тонкі обвідні лінії відповідають поверхні 2-вісного трекера

Fig. 4. Energy illumination of the surface of horizontally axial HEW (a) and HNS (b) tracking during the day: 1 – summer solstice; 2 – spring equinox; 3 – winter solstice. Thin contour lines correspond to the surface of the 2-axis tracker

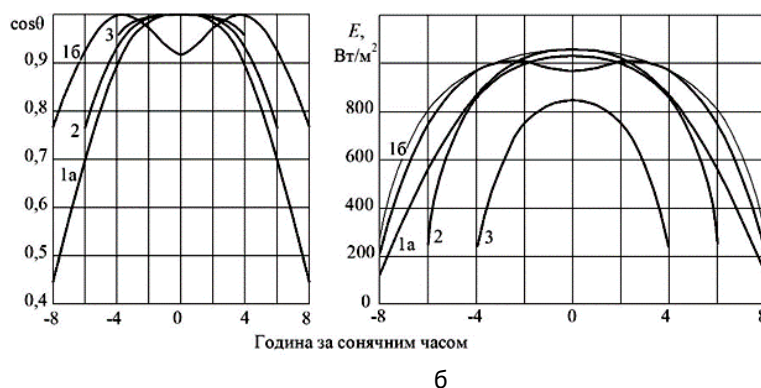
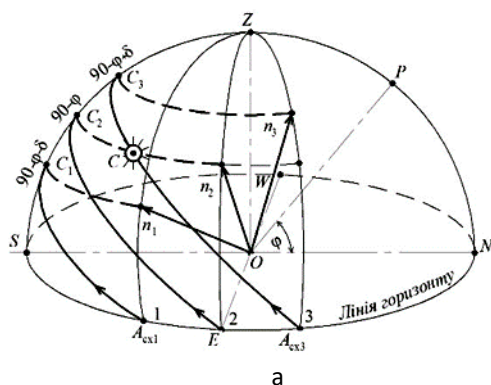


Рис. 5. Сезонні траєкторії Сонця і кінця нормалі поверхні VA трекера за максимальної освітленості у полудень (а): 1 – взимку; 2 – рівнодення; 3 – літню та його орієнтаційна ефективність (б) й енергетична освітленість (в) у день літнього сонцестояння з кутами нахилу: 1 – 50° і 2 – $26,55^\circ$; 2 – весняного рівнодення; 3 – зимового сонцестояння; тонкі лінії відповідають 2-вісному трекеру

Fig. 5. Seasonal trajectories of the Sun and the end of the normal surface of the VA tracker at maximum light at noon (a): 1 – in winter; 2 – equinox; 3 – in summer and its approximate efficiency (b) and energy illumination (c) on the day of the summer solstice with angles of inclination: 1 – 50° and 2 – $26,55^\circ$; 2 – spring equinox; 3 – winter solstice; thin lines correspond to a 2-axis tracker

Вертикально-поворотний пристрій (VA tracker) забезпечує впродовж дня рівність азимутів Сонця і поверхні стеження $\gamma(t) = \gamma_s(t)$ при сталому куті її нахилу (рис. 5, а). Там сонячні траєкторії позначені суцільними скісними лініями, а кінці нормалі стежної поверхні – пунктирними дугами концентричних кіл. При рівних азимутах загальна формула (19) зводиться до такого вигляду:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta = \cos(\theta_z - \beta). \quad (28)$$

У цьому пристрої оптимальна освітленість поверхні прямими сонячними променями реалізується у сонячний полудень за умови $\theta_z = \beta$, коли обидві траєкторії дотикаються. Натомість при $\beta > \theta_z(\max)$ ці траєкторії перетинаються симетрично відносно полудня. Відповідно першому випадку залежність $\cos \theta(t)$ характеризують кривою з одним максимумом у полудень, а у другому – двома, симетричними відносно локального полудневого мінімуму. У цих точках енергетична освітленість стежної поверхні чисельно рівна інтенсивності прямого потоку сонячної радіації G_b . Результати розрахунку параметрів інсоляції відображені на рис. 5 б і рис. 5 в, показують, що максимальний енергетичний денний експозиції відповідає нахил поверхні під кутом $\beta = \phi$.

Полярно-поворотний пристрій, у якому площа стеження суміщена з паралельною земній віссю обертання (рис. 6), дозволяє відстежувати Сонце за найпростішим синхронним алгоритмом і сталою кутовою швидкістю $\omega = 15$ град/год. Під час рівнодення траєкторії Сонця і нормалі стежної поверхні збігаються з лінією небесного екватора.

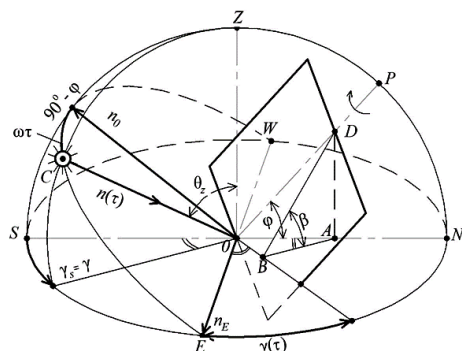


Рис. 6. Схема освітлення поверхні стеження полярно-поворотного пристрою

Fig. 6. Scheme of illumination of the tracking surface of the polar-rotating device

Якщо поверхня стеження суміщена з полярною віссю, то у полудень її азимут $\gamma = \gamma_s = 0$, нахил $\beta = \phi$, а у моменти сходу/заходу Сонця $\gamma = \pm 90^\circ$ і $\beta = 90^\circ$. У синхронному режимі стеження виконуються такі умови:

$$\delta = 0; \gamma(\tau) = \gamma_s(\tau) \text{ і } \beta(\tau) = \theta_z(\tau). \quad (29)$$

Як наслідок, кут освітлення протягом дня рівний нулю і виконуються такі співвідношення:

$AB \parallel OB \parallel DB$; $\angle OAB = \gamma$, бо AB є горизонтальною проекцією вектора нормалі поверхні стеження, перенесеного у точку D . Звідки $\tan \beta = AD/AB$; $AD = AO \cdot \tan \phi$; $AB = AO \cdot \cos \gamma_s = AO \cdot \cos \gamma$ і

$$\tan \beta(\tau) = \frac{\tan \phi}{\cos \gamma(\tau)}. \quad (30)$$

В інші дні року траєкторія Сонця і нормалі поверхні стеження лежать у площинах, які перетинаються під кутом, рівним сонячному схиленню. До такого ж значення змінюється й кут освітлення $\theta = \delta = \text{const}$. Тому за дотримання умови $\beta = \phi - \delta$, яке реалізують відхиленням площини стеження від осі обертання на кут схилення, кут освітлення зберігається рівним нулю.

За наведеними кутовими величинами одночасно розраховані інтенсивності дифузного і відбитого потоків сонячної радіації до нахиленої поверхні. Отже, денна ефективність стеження визначена за відношенням експозицій одновісних і двовісних пристроїв загальним потоком сонячної радіації. Денні експозиції чисельно рівні площам під кривими $G_{tb}(\tau)$, які розраховано чисельним інтегруванням методом трапецій з кроком дискретизації 30 хв. Усі розрахунки виконано у програмному середовищі Excel, зручному для роботи з табличними заданими величинами. Наведені у табл. 1 результати відповідають чотирьом варіантам прозорості атмосфери при $T_{LK} = 2, 3, 4$ і 5 і двом варіантам розподілу яскравості неба на широті 50° у день літнього сонцестояння. Вони також ілюстровані графічно на рис. 7 залежностями енергетичної ефективності від рівня каламутності атмосфери. Номерами 1, 2 (суцільні лінії) позначено ефективність, розраховану за відношенням експозицій у припущенні моделі ізотропного неба, а номерами 3 і 4 (пунктирні лінії) – неізотропного. Непарні номери відповідають освітленню тільки прямими соняч-

Таблиця 1. Результат моделювання енергетичної ефективності поверхні стеження при ізотропному та анізотропному розподілі радіаційних потоків

Table 1. The result of modeling the energy efficiency of the monitoring surface for isotropic and anisotropic distribution of radiation fluxes

Трекер	Параметр	$T_{LK} 2$		$T_{LK} 3$		$T_{LK} 4$		$T_{LK} 5$	
		Ізотр.	Аніз.	Ізотр.	Аніз.	Ізотр.	Аніз.	Ізотр.	Аніз.
Двовісний	$H_{b\beta}$	14213	15404	11864	13348	9998	11614	8487	10145
	H_{tb}	15151	15885	13194	14011	11702	12516	10542	11321
РА	$H_{b\beta}$	13040	14156	10884	12257	9173	10660	7786	9309
	$\eta\%$ 2-віс	91,7	91,90	91,7	91,83	91,75	91,79	91,74	91,76
	H_{tb}	14123	14829	12281	13077	10870	11673	9768	10544
	$\eta\%$ 2-віс	93,21	93,35	93,08	93,33	92,89	93,26	92,66	93,14
ВА $\beta = 50^\circ$	$H_{b\beta}$	13483	14606	11298	12703	9548	11085	8121	9705
	$\eta\%$ 2-віс	94,86	94,82	95,23	95,17	95,50	95,45	95,69	95,66
	H_{tb}	14485	15132	12690	13430	11305	12061	10218	10955
	$\eta\%$ 2-віс	95,60	95,26	96,18	95,85	96,61	96,36	96,93	96,77
HNS	$H_{b\beta}$	13452	14584	11247	12656	9486	11023	8055	9633
	$\eta\%$ 2-віс	94,65	94,68	94,80	94,82	94,88	94,91	94,91	94,95
	H_{tb}	14359	14993	12565	13272	11194	11897	10127	10795
	$\eta\%$ 2-віс	94,77	94,38	95,23	94,73	95,66	95,05	96,06	95,35
HEW	$H_{b\beta}$	9922	10697	8440	9425	7235	8336	6236	7397
	$\eta\%$ 2-віс	69,81	69,44	71,14	70,61	72,36	71,78	73,48	72,91
	H_{tb}	10766	10992	9750	9966	8983	9177	8391	8567
	$\eta\%$ 2-віс	71,06	69,20	73,89	71,13	76,76	73,32	79,60	75,67

Примітки:

1. Ефективність РА трекера розраховано в припущенні, що площа стеження суміщена з віссю обертання; 2. Ефективність ВА трекера розраховано для випадку кута нахилу поверхні, рівного широті майданчика 50° .

ними променями $\eta(H_{b\beta})$, а парні – сумарними потоками сонячної радіації $\eta(H_{t\beta})$.

У табл. 1 кут нахилу поверхні VA трекера $\beta=50$ відповідає оптимальному з огляду на максимальну експозицію у день літнього сонцестояння. Звичайний конструктивний варіант суміщення стеження PA трекера з віссю обертання відповідає максимальному використанню потенціалу сонячної енергії під час рівнодення. Варіант сезонного відхилення сприймальної поверхні PA трекера від осі обертання на кут, рівний поточному сонячному схилу рівнодення, не розглядався, бо він рівнозначний ефективності двовісного пристрою.

Висновки. Енергетичну ефективність режиму стеження за Сонцем одновісними трекерами визначено відносно максимальної освітленості та енергетичної експозиції поверхні двовісних трекерів, прийнятих за одиницю. Кількісні оцінки змінюються з тривалістю освітлення і внесками непрямих потоків сонячної радіації, опосередковано врахованих фактором каламутності атмосфери Лінке – Кастена. Результати порівняння залежать від широти місцевості, сезону року, стану атмосфери і прийнятої моделі потоків сонячної радіації, які нескладно врахувати простою зміною вхідних величин у комп'ютерній програмі, доступній для роботи особам з мінімальними навичками обробки табличних даних. Виявлені закономірності доцільно враховувати для оцінки достовірності наведених у літературі повідомлень про досягнуту ефективність інсталяцій з пристроями стеження.

ПОСИЛАННЯ

1. Renewables 2021 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat. 2021. 371 p.
2. Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang and Chiu-Feng Lin. *Sun Tracking Systems: A Review. Sensors*, 2009, 9, 3875–3890.
3. Georgios A. Vokas, Georgios Ch. Zoridis, Konstantinos V. Lagogiannis. Single and dual axis PV energy production over Greece: Comparison between measured and predicted data. *Energy Procedia*, 74, 2015. 1490–1498.
4. Bouziane Khadidja, Korichi Dris, Azoui Boubeker, Setou Nouredine. Optimisation of a Solar Tracker System for Photovoltaic Power Plants in Saharian region, Example of Ouargla. *Energy Procedia*, 50, 2014. 610–618.
5. Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich. Modeling of photovoltaic systems using matlab. Publ. by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016. p. 225.
6. Scharmer K., Greif J. The European Solar Radiation At-las. Vol. 1. Paris. Les Presses de l'École des Mines. 2000. 98 p.
7. Rigollier C., Bauer O., Wald L. On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*. 2000. No. 68(1). Pp.33-48. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00361373>. Submitted on 13 Feb 2009.
8. Гальчак В. П., Боярчук В. М., Сиротюк В. М., Сиротюк С. В. Параметри прямого потоку сонячної енергії при ясному небі з урахуванням прозорості атмосфери.

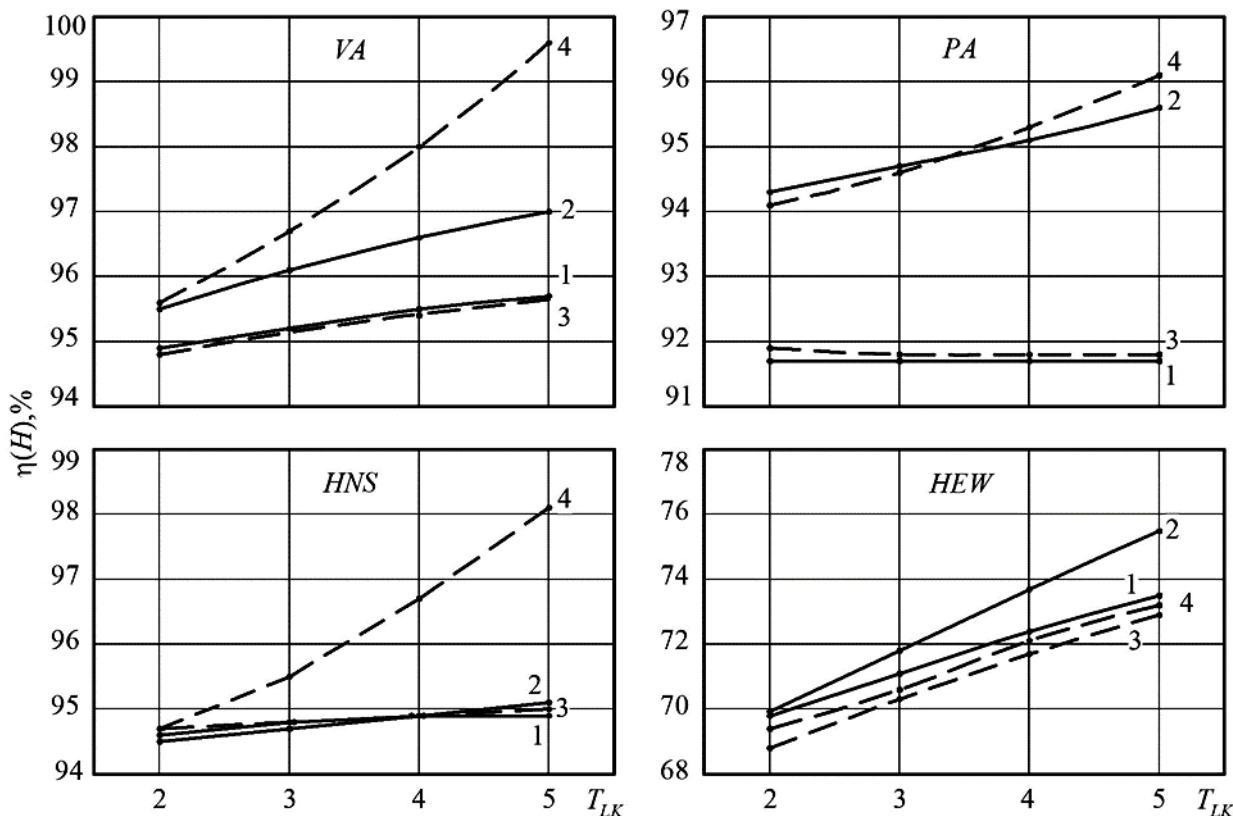


Рис. 7. Залежність енергетичної ефективності від каламутності атмосфери для ізотропного та неізотропного розподілу яскравості неба

Fig. 7. Dependence of energy efficiency on atmospheric turbidity for isotropic and non-isotropic distribution of sky brightness

Відновлювана енергетика. 2019. № 2. с. 22–31. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).22-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).22-31)

9. Pérez-Burgos A., Díez-Mediavilla M., Alonso-Tristán C., and Rodríguez-Amigo M. C. Analysis of solar direct irradiance models under clear-skies: Evaluation of the improvements for locally adapted models. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9, 2017, 023703.
10. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes. 4ed. Copyright 2013 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. p. 910.
11. Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering. Processes and Systems. Second Edition. Amsterdam: Elsevier Inc., 2014. p. 819.
12. Андрієвський С. М., Климишин І. А. Курс загальної астрономії. Одеса: Астропринт, 2007. 480 с.
13. Жаров В. Е. Сферическая астрономия. Фрязино, 2006. 480 с.
5. Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich. Modeling of photovoltaic systems using matlab. Publ. by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016. p. 225.
6. Scharmer K., Greif J. The European Solar Radiation Atlas. Vol. 1. Paris. Les Presses de l'École des Mines. 2000. 98 p.
7. Rigollier C., Bauer O., Wald L. On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. Solar Energy. Elsevier. 2000. No. 68 (1). Pp.33–48. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00361373>. Submitted on 13 Feb 2009.
8. Hal'chak V. P., Boyarchuk V. M., Syrotyuk V. M., Syrotyuk S. V. Parametry pryamoho potoku sonyachnoyi enerhiyi pry yasnomu nebi z urakhuvannyam prozorosti atmosfery. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2019. № 2. s. 22–31. [in Ukr.]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).22-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).22-31)
9. Pérez-Burgos A., Díez-Mediavilla M., Alonso-Tristán C., and Rodríguez-Amigo M. C. Analysis of solar direct irradiance models under clear-skies: Evaluation of the improvements for locally adapted models. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9, 2017, 023703.
10. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes. 4ed. Copyright 2013 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. p. 910.
11. Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering. Processes and Systems. Second Edition. Amsterdam: Elsevier Inc., 2014. p. 819.
12. Andriyevs'kyi S. M., Klymyshyn I. A. Kurs zahal'noyi astronomiyi. Odesa: Astroprynt, 2007. 480 s. [in Ukr.].
13. Zharov V. Ye. Sfericheskaya astronomiya. Fryazino, 2006. 480 s. [in Rus.].

REFERENCES

1. Renewables 2021 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat. 2021. 371 p.
2. Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang and Chiu-Feng Lin. Sun Tracking Systems: A Review. *Sensors*, 2009, 9, 3875–3890.
3. Georgios A. Vokas, Georgios Ch. Zoridis, Konstantinos V. Lagogiannis. Single and dual axis PV energy production over Greece: Comparison between measured and predicted data. *Energy Procedia*, 74, 2015. 1490–1498.
4. Bouziane Khadidja, Korichi Dris, Azoui Boubeker, Settou Noureddine. Optimisation of a Solar Tracker System for Photovoltaic Power Plants in Saharian region, Example of Ouargla. *Energy Procedia*, 50, 2014. 610–618.