

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 681.5

DOI 10.20535/1813-5420.4.2021.257249

В.О. Коровушкін, студент, ORCID 0000-0002-7571-7124

В.Г. Дубовик, ст. викл., ORCID 0000-0001-8884-8222

А.В. Босак, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-0545-9980

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ОДНООСЬОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

Розвиток «зеленої» енергетики України передбачає збільшення кількості електроенергії, згенерованої за допомогою фотоелектричних модулів (ФЕМ). При цьому ФЕМ мають недоліки, пов'язані з непостійністю видобутку електроенергії внаслідок добового та річного руху Сонця та затемнення модулів. Задля підтримання рівномірної генерації протягом дня та року, замість встановлення надлишкової потужності, ФЕМ можливе застосування системи їх орієнтування перпендикулярно сонячним променям.

В статті було наведено та проаналізовано залежності потрапляння сонячної енергії на довільно зорієнтовану площину та побудовано графіки зміни її надходження протягом доби та року. Розглянуто три випадки монтажу сонячних панелей: на двохосовій системі стеження за Сонцем, на системі стеження за Сонцем за висотою та на системі стеження за Сонцем за азимутом. Наведено алгоритми методу розрахунку параметрів системи одноосової та двохосової орієнтації фотоелектричного модуля під час встановлення в м. Києві. Зроблено оцінку рівнів енергоефективності використання сонячної енергії для розглянутих систем фотоелектричних перетворювачів.

Ключові слова: сонячна енергія, сонячні батареї, трекер, система стеження за сонцем, енергоефективність.

Вступ. На сьогодні існує світова тенденція до зниження частки вуглецевої генерації електроенергії із збільшенням низьковуглецевого видобутку, зокрема з застосуванням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Так, у 2019 році на низьковуглецеві джерела енергії припадало 37% від загальної кількості світової генерації, з них на фотоелектричні системи (ФЕС) – 27% [1].

При використанні ФЕС мають свої переваги: відносна легкість проектування та монтажу, відсутність рухомих елементів, а отже і висока механічна міцність. Окрім того, ФЕС є екологічно чистою технологією, адже 90% конструктивних матеріалів фотоелектричних модулів можуть бути перероблені та використані повторно [2]. В середньому, щорічно на територію України надходить близько 750 млрд ГВт•год сонячної енергії, що значно перевищує сучасні потреби країни. Виходячи з цього, потенціал ФЕС є достатньо високим для широкого його використання. Це підтверджується і прогнозованим балансом електроенергії об'єднаної електроенергетичної системи України на 2021 рік, згідно з яким на ВДЕ припадає 8,69% згенерованої електроенергії, з яких 51,5% – на ФЕС [3].

У ФЕС є свої недоліки, зокрема, низький, відносно інших джерел енергії ККД: для найбільш поширених, кремнієвих ФЕМ він складає 21 – 27%; для багатошарових – до 47% при стандартних тестових умовах (STC) [4]. Варто зазначити, що багатошарові ФЕМ майже ніколи не використовуються в наземних ФЕС через їх високу вартість та невелику питому вагу в світовому виробництві ФЕМ.

Мета та завдання: підвищення рівнів енергоефективності використання сонячних батарей шляхом оцінки значень надходження сонячної енергії на похилу площину плоских фотоелектричних модулів в

залежності від системи позиціонування; оцінка параметрів одноосової системи наведення сонячних панелей та порівняння її ефективності зі двохосовою.

Аналіз досліджень і публікацій [5-9] показав, що особливістю систем з застосуванням ФЕС є непостійність згенерованої електроенергії в часі, спричинена частковим чи повним затемненням сонячної батареї (СБ), що викликане скупченням в атмосфері водяної пари з мілкими твердими частинками і добовим ходом Сонця по небесній сфері. Для забезпечення необхідної потужності джерел енергії з застосуванням сонячних технологій встановлюють надлишкову потужність СБ, збільшуючи площу сприймання енергії Сонця, при цьому монтують їх під таким кутом, щоб середньодобова кількість сонячної енергії, яка надходить на поверхню ФЕМ була максимальною. Замість цього, можуть застосовуватись системи наведення СБ, за допомогою яких кут падіння сонячних променів відносно поверхні СБ залишається перпендикулярним.

Матеріал і результати досліджень

Потужність, що виробляє ФЕМ прямо пропорційна до кількості світла, що потрапляє на його поверхню:

$$W_{\text{уст}} = W_{\text{инс}} \cdot k \cdot \cos(\theta), \quad (1)$$

де $W_{\text{инс}}$ – потужність сонячних променів, що падають на панель; k – коефіцієнт перетворення світлової енергії в електричну, залежить від конструктивних матеріалів та внутрішньої структури модуля; θ – кут між напрямом випромінювання до довільно зорієнтованої поверхні та нормаллю до цієї поверхні.

Ескіз надходження сонячної енергії на ФЕМ подано на рис. 1:

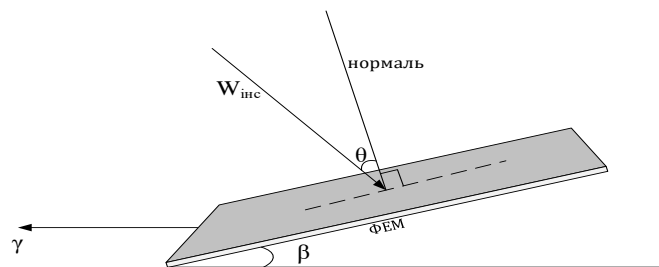


Рисунок 1 – Схема параметрів для оцінки значення надходження сонячної енергії на довільно зорієнтований ФЕМ

Розглянемо три випадки встановлення ФЕМ:

- ФЕМ, встановлені на двохосовій системі стеження за Сонцем;
- ФЕМ, встановлені на системі стеження за Сонцем за висотою;
- ФЕМ, встановлені на системі стеження за Сонцем за азимутом,

та порівняємо кількість сонячної енергії, що надходить при кожному типі монтажу ФЕМ.

За рис.1 кут падіння сонячних променів $\cos(\theta)$ на довільно зорієнтовану поверхню можна зйти з формули (2) [10]:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)\sin(\varphi)\cos(\beta) - \sin(\delta)\cos(\varphi)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\beta)\cos(\tau) + \cos(\delta)\sin(\varphi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\tau) + \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\tau), \quad (2)$$

де β – кут нахилу поверхні ФЕМ до горизонтальної площини, град; δ – схилення Сонця, град; φ – географічна широта місцевості, де встановлений ФЕМ; τ – годинний кут Сонця; γ – азимутальний кут площини відносно півдня, град.

Для розрахунку кутів β , δ та τ задаємося наступними вхідними величинами:

- координати розташування сонячної батареї: місто Київ із широтою $\varphi = 50.45^\circ$;
- день року: розрахунок проводиться для 21.06, 21.12, 21.03 та 23.09 – днів літнього та зимового сонцестояння і весняного та осіннього рівнодення 2021 року відповідно;
- година дня: дані обчислюються на кожну годину дня;

Для зазначених днів схилення Сонця δ визначимо за допомогою спрощеної формули Купера (3). Занесемо отримані дані в табл. 1.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right)^\circ, \quad (3)$$

де n – порядковий номер дня року ($n=1$ відповідає 1-му січня).

Таблиця 1 – Значення схилення Сонця для обраних днів року

	21.06	23.09	21.12	21.03
<i>n</i>	172	266	355	80
<i>δ</i>	23,45	0	-23,45	0

Оскільки середній час *t* на даному меридіані в будь-який момент чисельно дорівнює годинному куту τ вираженого в часовій мірі плюс 12^h [11], тобто (4)

$$\tau = t + 12h, \quad (4)$$

при цьому годинний кут виражається в годинній мірі з урахуванням 24 год = 360°, відповідно 1 год = 15°. Його розрахунок виконаємо за формулою (5) з кроком в 1 годину:

$$\tau = 15^\circ(12 - t). \quad (5)$$

Варто зазначити, що, оскільки будь-який ФЕМ покривається шаром захисного скла, слід враховувати пропускну та поглинальну здатність цього шару. Візьмо для розрахунків усереднені значення: один шар скла; коефіцієнт заломлення $n_3 = 1,5$; товщина $L = 3,2 \text{ мм} = 0,32 \text{ см}$; показник поглинання $k = 0,04 \text{ см}^{-1}$ – скло чисте.

Відбивальна здатність прозорих матеріалів у випадку перпендикулярного падіння сонячних променів визначається за формулою (6):

$$\rho = [(n_3 - 1)/(n_3 + 1)]^2. \quad (6)$$

Визначивши кут падіння θ (рис. 3) визначимо кут заломлення θ_3 за формулою (7):

$$n/n_3 = \sin(\theta_3)/\sin(\theta). \quad (7)$$

Враховуючи коефіцієнт заломлення повітря $n = 1$, отримаємо:

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{1,5}\right).$$

Зрозуміло, що коли кут θ перевищує значення 90°, сонячні промені не падають на поверхню ФЕМ.

У випадку, коли промені падають під кутом θ , маючи значення кута заломлення θ_3 , відбивальну здатність можна обчислити за формулою (8):

$$\rho = \left(\frac{1}{2}\right) \left[\frac{\sin^2(\theta_3 - \theta)}{\sin^2(\theta_3 + \theta)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_3 - \theta)}{\text{tg}^2(\theta_3 + \theta)} \right]. \quad (8)$$

Пропускна здатність одношарового захисного скла $\tau_{\text{пр}}$ знаходимо з формули (9):

$$\tau_{\text{пр}} = (1 - \rho)/(1 + \rho). \quad (9)$$

Поглиняльну здатність шару захисного скла визначимо з закону Бугера-Ламберта-Бера (10):

$$\tau_{\text{пог}} = e^{-\frac{kL}{\cos(\theta_3)}}. \quad (10)$$

Розглянемо ФЕМ, встановлені на двохосовій системі стеження за Сонцем. Оскільки точність наведення складає у більшості випадків 2°, для розрахунків приймаємо найгірший випадок позиціонування, $\theta_{\text{поз}} = 2^\circ$. За формулою (7) визначимо $\theta_{\text{поз}}$.

$$\theta_{\text{поз}} = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{1,5}\right) = \arcsin\left(\frac{0,035}{1,5}\right) = 1,32^\circ$$

Підставивши отримане значення в формулу (8), отримаємо:

$$\rho = \left(\frac{1}{2}\right) \left[\frac{\sin^2(\theta_{\text{п.з.}} - \theta_{\text{поз.}})}{\sin^2(\theta_{\text{п.з.}} + \theta_{\text{поз.}})} + \frac{\text{tg}^2(\theta_{\text{п.з.}} - \theta_{\text{поз.}})}{\text{tg}^2(\theta_{\text{п.з.}} + \theta_{\text{поз.}})} \right] = \left(\frac{1}{2}\right) \left[\frac{\sin^2(-0,68^\circ)}{\sin^2(3,32^\circ)} + \frac{\text{tg}^2(-0,68^\circ)}{\text{tg}^2(3,32^\circ)} \right] = 0,043$$

Наступним кроком знаходимо пропускну та поглинальну здатності захисного скла: $\tau_{\text{пр}} = 0,918$; $\tau_{\text{пог}} = 0,987$.

Питому потужність повної сонячної радіації визначимо як суму потужностей прямої та розсіяної радіації, нехтуючи, для зручності, значеннями альbedo атмосфери та земної поверхні, оскільки їх вплив в умовах даного дослідження не суттєвий.

Для визначення сонячного випромінювання (СВ), що падає на поверхню перпендикулярну випромінюванню скористаймося формулами (11,12) [12]:

- для прямого СВ:

$$S_{\text{орт}} = 1085 - 194,1 \cdot \sin^{-1}(h) + 11,36 \cdot \sin^{-2}(h); \quad (11)$$

- для дифузного СВ:

$$D_{\text{орт}} = 137,1 - 28,82 \cdot \sin^{-1}(h) + 2,27 \cdot \sin^{-2}(h); \quad (12)$$

де $\sin^{-1}(h)$ – оптична маса атмосфери без урахування кривизни Землі, h – висота Сонця.

$$\sin(h) = \sin(\delta)\sin(\varphi) + \cos(\varphi)\sin(\delta)\cos(\tau), \quad (13)$$

де від'ємному куту h відповідає випадок, коли сонячні промені не падають на обрану поверхню.

Визначивши значення прямої та розсіяної радіації, враховуючи пропускну та поглинальну здатність захисного скла $\tau_{np} = 0,918$ та $\tau_{noz} = 0,987$ відповідно; кут падіння сонячних променів $\theta_{noz} = 2^\circ$; питому потужність сонячної енергії, що потрапляє безпосередньо на поверхню фотоперетворювача, встановленого на систему наведення, визначимо за формулою (14):

$$Q_{op} = (S_{орт} \cdot \cos(\theta) + D_{орт}) \cdot \tau_{пр} \cdot \tau_{пог}; \quad (14)$$

Результати розрахунку кількості енергії, що поступає безпосередньо на поверхню фотоперетворювача, встановленого на пристрій наведення на сонце, для обраних днів представлені на рис. 2.

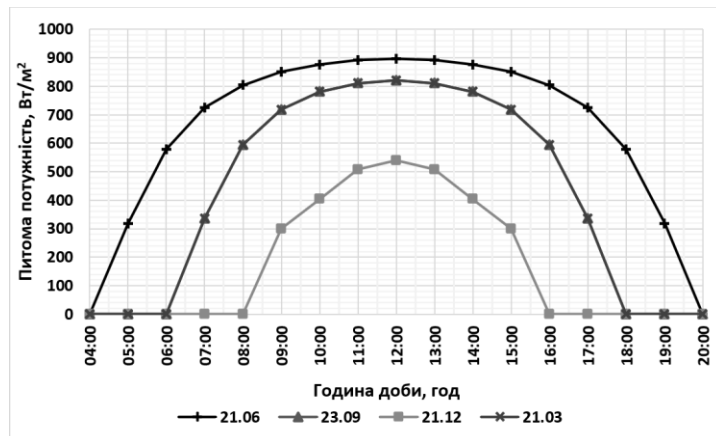


Рисунок 2 – Графіки зміни питомої потужності енергії на поверхні фотоперетворювача, який встановлено на двохосьовий пристрій наведення на Сонце

Розглянемо другий випадок, ФЕМ, встановлені на системі стеження за Сонцем за висотою. Кут γ знаходимо за допомогою аналем, що були змодельовані за допомогою програмного забезпечення "Гелиограф 3.6. Дані одержані для 2021 року, м. Києва з координатами $57^\circ 27'$ п.ш. $30^\circ 31'$ с.д. з інтервалом в один день. Отримані аналеми зображені на рис.3.

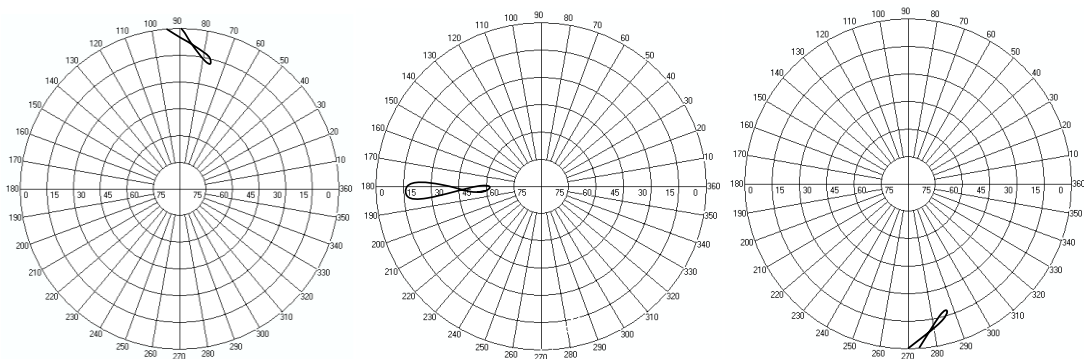


Рисунок 3:

- а – Аналеми положення Сонця для м. Києва, отримані для 6:00 год. (азимут підписані по колу, висоти – по горизонталі);
- б – Аналеми положення Сонця для м. Києва, отримані для 12:00 год. (азимут підписані по колу, висоти – по горизонталі);
- в – Аналеми положення Сонця для м. Києва, отримані для 18:00 год. (азимут підписані по колу, висоти – по горизонталі).

З рис. 3 видно, що найбільш доцільним буде встановлення ФЕМ під кутом $\gamma = 0^\circ$, відповідно $\sin(\gamma) = 0$, $\cos(\gamma) = 1$. Будемо враховувати, що система наведення працюватиме з похибкою у 2° , тоді $\cos(\beta) \approx 1$; $\sin(\beta) \approx 0,03$.

Далі проводимо розрахунки відповідно $\theta_{поз}^{вис}$ – кута θ після заломлення, поглинальну та пропускну $\tau_{пог}^{вис}$ та $\tau_{пр}^{вис}$ здатність захисного шару скла. Підставивши відповідні значення у формулу (14) знайдемо

кількість енергії, що поступає безпосередньо на поверхню фотоперетворювача, встановленого на одноосьовий пристрій наведення на Сонце за висотою. Графічне відображення отриманих результатів наведено на рис. 4.

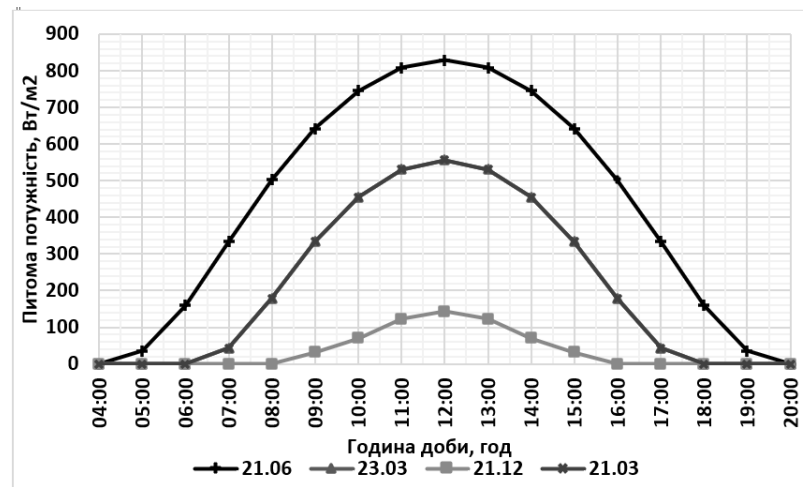


Рисунок 4 – Графіки зміни питомої потужності енергії на поверхні фотоперетворювача, який встановлено на одноосьовий пристрій наведення на Сонце за висотою

Розглянемо ФЕМ, встановлені на системі стеження за Сонцем за азимутом. Для цього задаємося кутом $\beta = 30^\circ$, тоді $\cos(\beta) \approx 0,87$; $\sin(\beta) = 0,5$. Будемо враховувати, що система наведення працюватиме з похибкою у 2° , відповідно $\sin(\gamma) = 0,03$; $\cos(\gamma) \approx 1$.

Подібно до попереднього випадку розрахуємо кількість енергії, що поступає безпосередньо на поверхню фотоперетворювача, встановленого на одноосьовий пристрій наведення на Сонце за азимутом. Графічне відображення отриманих результатів наведено на рис. 5.

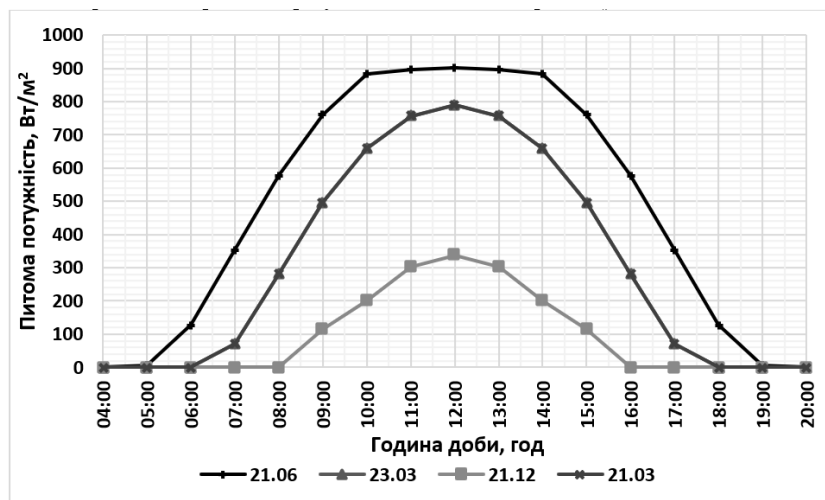


Рисунок 5 – Графік зміни питомої потужності енергії, на поверхні фотоперетворювача, який встановлено на одноосьовий пристрій наведення на Сонце за азимутом, для обраних днів

Як видно з рис. 2, 4, 5 - значення сонячної енергії, що надходить 21.03 і 23.09 – у дні весняного та осіннього рівнодення відповідно – однакова.

Результати досліджень

ККД кожної з розглянутих одноосьових систем відносно двохосьової визначимо за формулою (15):

$$\eta = \frac{Q_{одн\Sigma}}{Q_{дв\Sigma}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

де $Q_{одн\Sigma}$ – сумарна кількість добової енергії, що потрапляє на зорієнтовану за однією з координат поверхню, $Q_{дв\Sigma}$ – сумарна кількість добової енергії, що потрапляє на зорієнтовану за двома координатами поверхню.

$Q_{одн\Sigma}$ та $Q_{дв\Sigma}$ знайдемо за допомогою методу трапецій, де кількість i вузлів відповідатиме кількості точок, взятих для побудови кожного з графіків, тобто $i = 16$. Результати обчислень наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення ККД систем наведення на Сонце за азимутом та висотою відносно двохосової системи

Тип системи	21.06.21	23.09.21	21.12.21	21.03.21
за азимутом	73,85%	72,85%	53,08%	72,85%
за висотою	66,26%	49,87%	19,93%	49,87%

Як видно з табл. 2, на фотоелектричну панель, встановлену на систему наведення за азимутом потрапляє приблизно на 8-33% сонячної енергії більше, ніж на таку, що встановлено на систему наведення за висотою; при цьому енергетичні втрати відносно двохосової системи стеження складають приблизно 26-80% в залежності від пори року.

В рамках даної роботи визначити економічну доцільність встановлення кожної із систем відносно інших неможливо, адже значення власного споживання енергії системою є непостійним і, як і загальна вартість установки, залежить від конфігурації самої системи. Це питання потребує окремого дослідження.

Висновки. У роботі проаналізовано залежності для значень сонячної енергії, яка потрапляє на довільно зорієнтовану площину протягом року під час встановлення в м. Києві. З'ясовано, що у порівнянні з двохосовою системою наведення на фотоелектричну панель, встановлену на систему наведення за азимутом потрапляє приблизно 53-74 відсотків сонячної енергії, а на таку, що встановлено на систему наведення за висотою – 20-66. Тобто система наведення сонячних панелей на Сонце за азимутом є на 8-33 відсотків ефективнішою. Це визначено за рахунок використання алгоритму методу розрахунку та вибору бажаної системи одноосової орієнтації фотоелектричного модуля.

Список використаної літератури

1. IEA (2020), "Global Energy Review 2019", IEA, Paris URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019> (дата звернення 22.08.2021).
2. Weckend S. End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels / S. Weckend, A. Wade, G. Heath., 2016. – 100 с.
3. Прогнозний баланс електроенергії об'єднаної електроенергетичної системи України на 2021 року станом на 04.11.2020 [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245487361&cat_id=245183250
4. Best Research-Cell Efficiency Chart [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
5. Singh G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review / Girish Kumar Singh. // Energy. – 2013. – №53. – С. 1–13.
6. Comparison of efficiencies of solar tracker systems with static panels single-axis tracking system and dual-axis tracking system with fixed mount / R. Dhanabal, V. Bharathi, R. Ranjitha, A. Ponni. // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). – 2013. – №2. – С. 425–430.
7. Tansu F. Efficiency Analysis Of The Solar Tracking PV Systems In Eskişehir Region / F. Tansu, B. F. Ümmühan. // Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering. – 2017. – №18. – С. 209 – 217.
8. Lee J. F. Performance of Dual-Axis Solar Tracker versus Static Solar System by Segmented Clearness Index in Malaysia / J. F. Lee, N. A. Rahim, Y. A. Al-Turki. // International Journal of Photoenergy. – 2013. – №2013. – С. 1–13.
9. Siva B. R. An Intellectual Dual Axis Efficient Solar Tracking System by Using IoT Integrated Control / B. R. Siva, B. Rajkiran, P. Sharma. // SSRN Electronic Journal. – 2020.
10. Староконь И. В. Методика оценки воздействия солнечного излучения на температурное состояние морских стационарных платформ / И. В. Староконь. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №2.
11. Курс общей астрономии / П. И. Бакулин, Э. В. Кононович, В. И. Мороз. — М.: Наука, 1976.
12. Дудюк Д. Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, Я. М. Гнатишин. – Львів: "Магнолія 2006", 2008. – 188 с.

V. Korovushkin, student, ORCID 0000-0002-7571-7124
V. Dubovyk, Senior Lecturer, ORCID 0000-0001-8884-8222
A. Bosak, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0545-9980
National Technical University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

ESTIMATED PARAMETERS IN THE SYSTEMS OF A SINGLE-AXIS ORIENTACIS OF A PHOTOELECTRIC MODULE

The development of "green" energy in Ukraine involves an increasing of the amount of electricity generated by photovoltaic modules (PMs). However, PMs have disadvantages associated with the inconsistency of electric generation in time due to the diurnal and annual motion of the Sun and to the shading of the modules. In order to maintain steady generation during the day and the year, there are two ways to minimize the impact of these factors. First one is to install an excess capacity which means higher cost of the solar plant and using an additional area. Second one is to apply a system of orientation PMs perpendicular to the sun's rays.

In the article three cases of solar panels installation are considered: using a two-axis tracking system, using a height tracking system and an azimuth tracking system. There was given the method and algorithms of calculation and analysis the parameters of the uniaxial and biaxial tracking system when installed in Kyiv. The algorithm involves calculation the coordinates of Sun in any moment of time for the considered location, pass-through and absorptive capacity of the protective glass, estimation the amount of the direct and diffuse solar radiation and their impact on the total radiation on the surface of the photoconverter. There was made an estimation of energy usage efficiency levels for the considered systems using the proposed algorithm.

Keywords: solar energy, solar panels, tracker, solar tracking system, energy efficiency.

References

1. IEA (2020), "Global Energy Review 2019", IEA, Paris URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019> (Accessed 22.08.2021).
2. Weckend S. End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels / S. Weckend, A. Wade, G. Heath., 2016. – 100 p.
3. Forecast balance of electric power of the United electric power system of Ukraine for 2021 URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245487361&cat_id=245183250 (Accessed 22.08.2021).
4. Best Research-Cell Efficiency Chart URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (Accessed 22.08.2021).
5. Singh G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. Energy. 2013. Vol. 53. Pp. 1–13.
6. Dhanabal R., Bharathi V., Ranjitha R., Ponni A. Comparison of efficiencies of solar tracker systems with static panel single-axis tracking system and dual-axis tracking system with fixed mount. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). 2013. Vol. 2. Pp. 425–430.
7. Tansu F., Ümmühan B. F. Efficiency Analysis Of The Solar Tracking PV Systems In Eskisehir. Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering. 2017. Vol. 18. Pp. 209 – 217.
8. Lee J. F., Rahim N. A., Al-Turki Y. A. Performance of Dual-Axis Solar Tracker versus Static Solar System by Segmented Clearness Index in Malaysia. International Journal of Photoenergy. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–13.
9. Siva B. R., Rajkiran B., Sharma P. An Intellectual Dual Axis Efficient Solar Tracking System by Using IoT Integrated Control. SSRN Electronic Journal. 2020.
10. Starokon I. V. Methodology for assessing the effects of solar radiation on the temperature of sea-based stationary platforms. Modern issues of science and education. 2014. Vol. 2. (Rus)
11. Bakulin P. I., Kononovich E. V., Moroz V. I. General astronomy course. Science. 1976. (Rus)
12. Duduk D. L., Mazepa S. S., Gnatishin J. M. Non-traditional Energy: The Basics of Theory and Exercises. Magnolia 2006. 2008. (Ukr)

Надійшла 21.11.2021
Received 21.11.2021