

Д.О. ОСТРЕНКО, (аспірант)**О.Ю. КОЛЛАРОВ (канд.техн.наук, доц.)****Державний вищий навчальний заклад****«Донецький національний технічний університет»****dmytro.ostrenko@gmail.com, kollarov@gmail.com**

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КУТА НАХИЛУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВДЕ

При розгляді роботи сонячної панелі та виконанні моделювання її роботи в [1] урахувалися такі вхідні параметри, як рівень сонячної інсоляції (кількість світла, що поступає на СП) та значення зовнішньої температури на самих сонячних батареях. Проте не було ураховано, при такому моделюванні, такий важливий параметр, як кут нахилу сонячних панелей. Значення цього параметру враховує, звичайно, рівень сонячної інсоляції, адже рівень світла, який потрапляє до СП напряму залежить від кута під яким вони розташовані. Однак не було розглянуто того випадку, що датчики(або люксметр) для виміру освітлення, можуть бути розташовані під кутом, відмінним від кута нахилу сонячної панелі або, що ще важливо, самі сонячні панелі через свої конструктивні особливості можуть недоотримувати кількості сонячного випромінювання, що не можуть врахувати датчики світла. Така можливість існує при куті нахилу близькому до нуля, тобто на світанку та заході сонця.

Дана стаття покликана забезпечити урахування впливу кута нахилу сонячних панелей через використання емпіричних залежностей та перевірити теоретичні засади, що були сформовані в минулих статтях [1-4].

Ключові слова: *електрична мережа, сонячні панелі, кут нахилу, максимальна потужність, енергоживлення, збір даних, моделювання, фотоелектрика, мікроконтролер.*

Стан питання. Вплив додаткових параметрів на роботу сонячних панелей зазначено в роботі [2], тут розроблено методику оцінки впливу сонячної енергії на поверхню панелі. Виявлено ступінь впливу хмарності на надходження сонячної енергії для розглянутого географічного району. Проведено порівняння результатів моделювання з використанням розробленої методики та спеціалізованих комп'ютерних програм.

Так в проаналізованій роботі [3], де дослідження проводилися для двох видів сонячних панелей - зафіксованої сонячної панелі та такої, яка змінює своє положення тільки по сезонах. Після цього результати вимірів були занесені у таблицю. З порівняння цих даних, можна зробити висновок, що система з використанням панелей, що відстежує рух сонця, дозволяє отримати на 10% більше виробленої потужності взимку і до 40% більше енергії в літній період, ніж у фіксованих панелей.

Також була дана рекомендація по загальній установці фотоелектричних панелей. Так сонячні панелі завжди повинні бути повернені на південь, якщо вони розташовані в Північній півкулі або «Істинний північ», якщо сонячна станція знаходиться в Південній півкулі. «Істинний північ» - це не те ж саме, що магнітний північ. Якщо для орієнтації панелей використовується компас, «Магнітне відхилення» слід використовувати для коригування різниці, яка варіюється від місця до місця.

Актуальність теми. В багатьох роботах пов'язаних з вивченням роботи фотоелектричних станцій, особливо у вітчизняних наукових роботах, залежність загальної виробленої потужності від кута нахилу сонячної панелі беруть до уваги лише у розрізі значення рівня сонячної інсоляції, тобто враховують цей вплив лише опосередковано.

Тому дана робота ставить за мету:

- Проаналізувати різні методи зміни значення кута нахилу та їх наслідки в роботі електричної мережі.
- Врахувати при виконанні математичного моделювання значення кут нахилу сонячних панелей.
- Підвищити значення виробленої потужності системи з використанням з ВДЕ, шляхом вибору певного методу зміни кута сонячних панелей.

Оптимальний кут нахилу сонячної панелі. Щоб отримати максимальну віддачу від фотоелектричних панелей (максимальну потужність на виході системи), необхідно встановлювати їх у напрямку, який охоплює найбільше сонячного освітлення. Також є ряд змінних у визначенні найкращого напрямку.

У наступній таблиці наведено найкращі дати для коригування кута нахилу (таблиця 1). Представлені дані представляють особливий інтерес так як наведені значення для широти, в якій географічно знаходиться територія України.

Таблиця 1. Дані для зміни кута нахилу сонячних панелей.

	Північна півкуля, час зміни кута нахилу	Південна півкуля, час зміни кута нахилу	Оптимальний кут нахилу широти від 25° до 50°
Налаштування кута в літній час.	18.04	18.10	(Широта*0.92)-24.3°
Налаштування кута восени.	24.08	23.02	(Широта*0.98)-2.3°
Налаштування кута взимку.	07.10	08.04	(Широта*0.89)+24°
Налаштування кута навесні.	05.03	04.09	(Широта*0.98)-2.3°

Загальна формула для розрахунку оптимального кута (K_{opt}) для будь-якої широти, з таблиці 1, виглядає наступним чином:

$$K_{opt} = (K_{ш} \cdot K_{м}) + D \quad (1.1)$$

де: - $K_{ш}$ - кут широти в градусах;

- $K_{м}$ – коефіцієнт множення, який визначається за часом року та географічним положенням.

- D – додаткові градуси, які визначають відхилення положення сонця в конкретний час від нормалі (на екваторі). Даний параметр також залежить від пори року та географічного положення, значення обох величин є табличними.

Кут нахилу панелі змінюється чотири рази на рік. Дане рішення вигідно для систем SmartGrid і це наочно показують експерименти, які були проведені в [4]. Так в зимовий час панель, закріплена під «зимовим кутом», буде показувати значення ефективності, вловлюючи від 80 до 87% енергії від джерела світла, в порівнянні з методикою оптимального відстеження. Навесні, влітку та восени ККД постійно фіксованих сонячних панелей буде ще нижче. Так навесні та восени значення $\eta = 74-75\%$, а влітку - 68-74%, останнє можна пояснюється тим, що в цю пору року сонце проходить велику область небосхилу, а фіксована панель не може захопити повністю цей шлях.

Літній час - це період року, коли система відстеження дає найбільшу вигоду в значенні виробленої потужності. Слід також звернути увагу, що кут установки панелей в зимовий період приблизно на 5° крутіше, ніж зазвичай рекомендується. Причина в тому, що взимку більшість сонячної енергії надходить в полудень, тому панель в цей час повинна бути спрямована майже прямо на Сонце. Кут точно налаштований для збору максимальної енергії протягом дня.

Кут нахилу в літній період приблизно на 12° нижче, ніж зазвичай рекомендується. Фактично, влітку для 25° широти панель насправді повинна бути трохи нахилена в сторону від екватора.

Отже з розглянутого вище, можна зробити висновок, що немає потреби в постійній динамічній зміні кута нахилу, тобто в застосуванні технологій МРРТ, якщо досліджувана установка не має промислової потужності. Адже використання технологій динамічної зміни кута нахилу, протягом дня, вимагає певних коштів на конструкції, додаткове устаткування та програмне забезпечення. Достатньо змінювати кут нахилу за сезонами, як було описано вище та проілюстровано на рисунку 1.



Рисунок 1 – Рекомендації щодо кута нахилу сонячних панелей, в залежності від пори року.

На рисунку значення α – це коефіцієнт нахилу, який визначається як кут, утворений від поверхні землі до поверхні сонячної фотоелектричної пластини.

Отже до зазначеного вище необхідно додати ще основні значення для розрахунку виробленої потужності та залежності цього значення від геометричного розташування панелей.

Так вихідна електрична потужність фотоелектричної панелі може бути виражена в (1.2):

$$P_{cn} = G_{cn} \cdot f_{cn} \cdot \left(\frac{I_T}{I_{T,S}} \right) \cdot [1 + \alpha_p \cdot (T_c - T_{c,s})] \quad (1.2)$$

де: - I_T та $I_{T,S}$ позначають рівень сонячної інсоляції [кВт/м^2] на фотоелектричних панелях у будь-який момент

часу та під час стандартного випробування умови відповідно (1 кВт/м^2).

$G_{\text{сп}}$ - номінальна потужність сонячних панелей.

$T_{\text{с}}$ та $T_{\text{с,с}}$ позначають температури сонячної комірки [$^{\circ}\text{C}$] фотоелектричних панелей в будь-який момент часу та стандартних умовах (що дорівнює $= 25^{\circ}\text{C}$).

$f_{\text{сп}}$ являє собою коефіцієнт зменшення фотоелектричної системи.

α_P - температурний коефіцієнт потужності [$\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$].

Ще однією важливою величиною є фактичний коефіцієнт пропускання-поглинання фотоелектричної панелі ($\tau\alpha$), який можна визначити за (1.3):

$$(\tau\alpha)I_T = I_T \cdot \eta_{PV} + U_L \cdot (T_{\text{ком}} - T_{\text{н.с.}}) \quad (1.3)$$

де:

- η_{PV} и U_L позначають ефективність і коефіцієнт теплопередачі навколишнього середовища фотоелектричної матриці;

- $T_{\text{ком}}$ и $T_{\text{н.с.}}$ позначають температуру комірки та температуру навколишнього середовища фотоелектричного модуля відповідно.

Значення η_{PV} вважається рівним нулю в умовах холостого ходу.

Для розрахунку повного впливу кута нахилу на потужність, яка вироблена фотоелектричною станцією необхідно ввести ще декілька змінних, що відповідають за геометричне розташування об'єкту генерації енергії фотонів в електричну, які показані на рисунку 2.

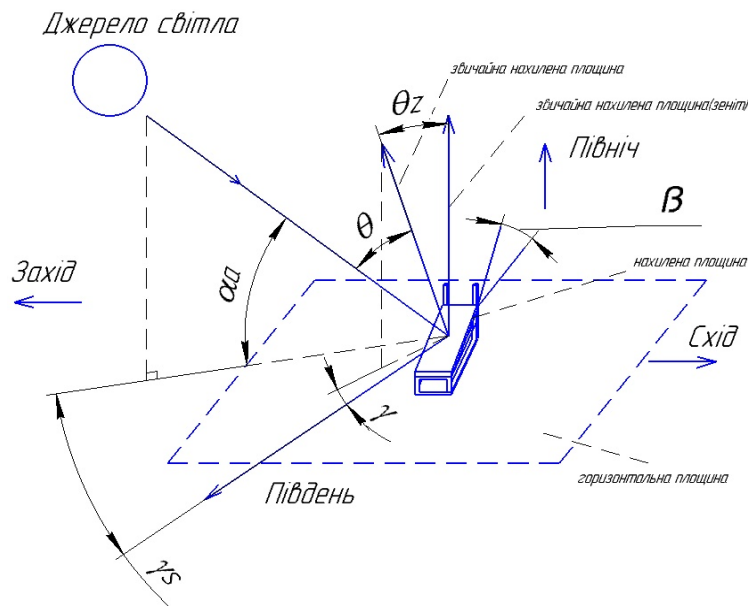


Рисунок 2 - Геометричний вигляд розташування сонячних панелей у тривимірному просторі.

На рисунку 2 показано:

- Кут відхилення (δ) - утворений лінією, що з'єднує центр Сонця і Землі з проекцією цієї лінії на екваторіальну площину та розраховується за:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{(284 + n)}{365}\right) \quad (1.4)$$

де: n - порядковий номер дня в році, відрахований від 1-го січня.

- часовий кут (ws) - це кутова міра часу, і вона еквівалентна 15° на годину. Вона також коливається від -180° до $+180^{\circ}$

$$ws = \cos^{-1}(-\tan(\phi) \tan(\delta))$$

- кут нахилу (β) - утворений площею поверхнею з горизонталлю. Його значення може змінюватися від 0 до 180° ;

- кут падіння (θ). Це кут між падаючим пучком потоку та нормаллю до плоскої поверхні;

- кут широти (ϕ), який утворений радіальною лінією, що з'єднує місце розташування з центром Землі та з проекцією лінії на екваторіальну площину;

- кут сонячного азимута (γ_s), який утворюється між горизонтальною лінією (в горизонтальній площині), спрямованої на південь, і проекцією лінії візування Сонця на горизонтальну площину;

Як видно з наведеного рисунку, побудована математична модель повністю імітує роботу фотоелектричної станції, тобто генерації в ній електричної енергії та її подальшого накопичення, перетворення та транспортування в загальну електричну мережу. В частині дослідів впливу значення кута нахилу на роботу електричної мережі, цікавим є саме ділянки енергосистеми, яка містить фотоелектричні панелі (рисунк 4).

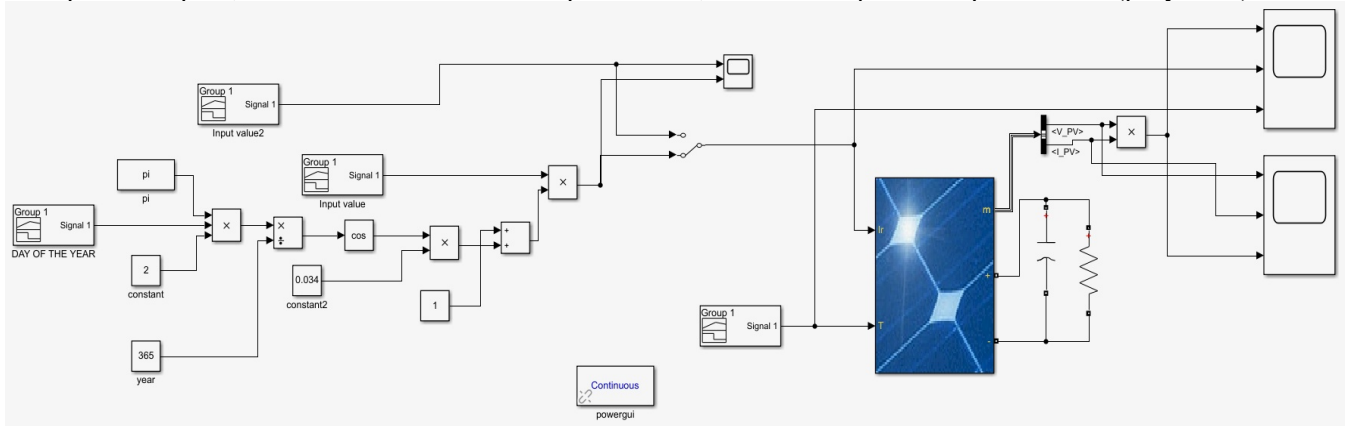


Рисунок 4 – Частина ФЕС, яка підлягала дослідів

Тому для цього окремо досліджувалась саме ця частина, а тип та характеристики СП були спеціально підібрані до реального стенду «Фотоелектрична станція», що знаходиться в ДВНЗ «ДонНТУ» (рисунк 5).

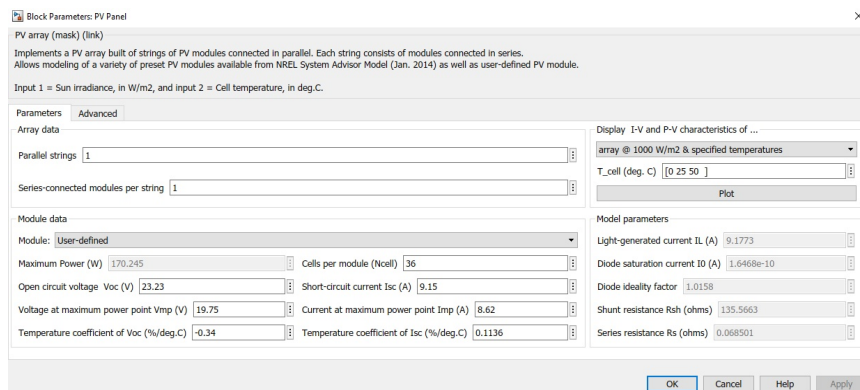


Рисунок 5 – Параметри сонячної панелі.

Також було враховано за допомогою виразу (1.5 та 1.10), значення кута нахилу за географічним положенням в певний період року та було взято до розгляду час з таблиці 1, для Північної півкулі. Так значення «п» з (1.5) змінювалося на – 64, 108, 236 та 280 (рисунк 6). Також для кожного часу було підібране відповідне значення.

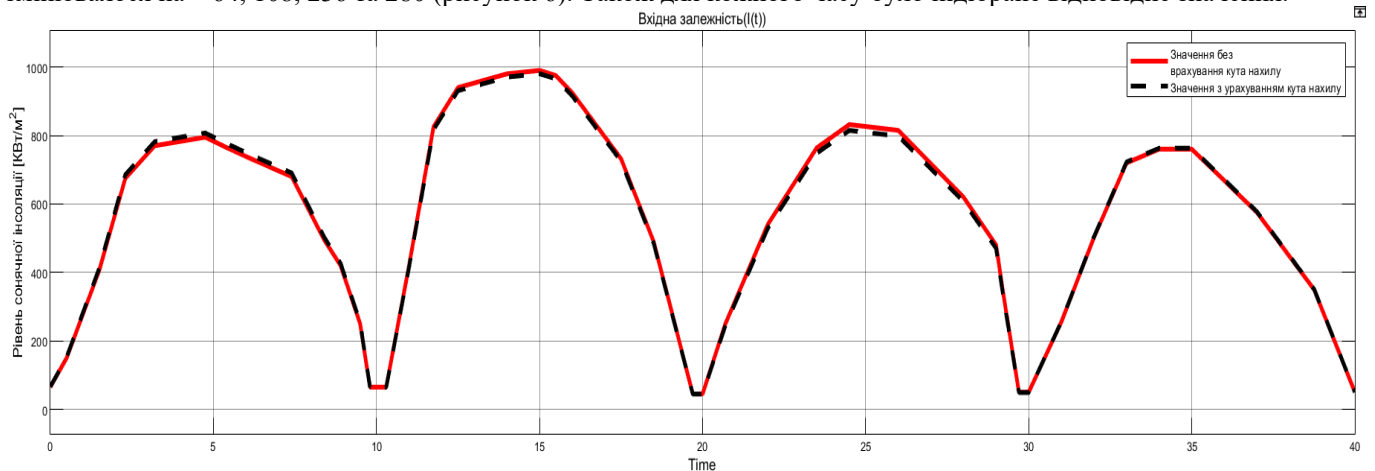


Рисунок 6 – Вхідні залежності I_1 , $I_2(t)$. Значення з урахуванням та без значення кута нахилу сонячних панелей

З рисунку 6 та таблиці 1 можна побачити, як впливає врахування в роботі ФЕС параметру «кута нахилу сонячних панелей». Практичні результати довели справедливості теоретичних припущень зроблених в [2-4].

Подальше використання цього методу наблизить значення, які отримані під час моделювання до практичних, що виходять при роботі з установкою.

Висновки. В даній статті було продемонстровано практичну значущість урахування, в побудові математичної моделі фотоелектричної станції, значення кута нахилу сонячних панелей. Для цього по-перше було проаналізовано стан питання та наявні методи зміни кута нахилу в роботі електричної мережі з сонячними панелями. По-друге було враховано, при побудові математичної моделі вплив геометричного розташування панелей.

Дослідження дозволили зробити висновок, що оптимальним методом керування кута нахилу фотоелектричних панелей є його посезонна зміна. Адже застосування цього способу дає збільшення виробленої потужності електромережі з ВДЕ, в середньому, влітку на 35%, а взимку на 10% в порівнянні з фіксованими панелями та не вимагає додаткового та часом дуже коштовного обладнання в порівнянні з динамічною зміною кута протягом доби.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1) Остренко Д.О., та Колларов О.Ю. «Розробка нейронної мережі з характеристиками MPPT контролера», збірник «Наукові праці Донецького Національного Технічного Університету, серія: електротехніка і енергетика» №1(19) – 2(20)'2018, м. Покровськ, с 23-27;
- 2) Patrapalli Durga Venkata Lakshmi, Make Madhu Manikya Kumar, Dasari Maharshi, Sornapudi Durga Prasad, "Solar power output with optimum tilt angle using Matlab", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 05 Issue: 04 | Apr-2018, pp 1131-1139
- 3) Manoj Kumar Sharma, Deepak Kumar, Sandeep Dhundhara, Dipesh Gaur and Yajvender Pal Verma "Optimal Tilt Angle Determination for PV Panels Using Real Time Data Acquisition", Global Challenges 2020, 4, Published by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim pp 12.
- 4) Onur Yemenici; Muhammed Osman Aksoy, «Numerical Study of Wind Loads on A Solar Panel at Different Inclination Angles», 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), Budapest, Hungary, 20.09.2018, pp 406-409
- 5) Остренко Д.О., та Колларов О.Ю. «Моделювання роботи фотоелектричної станції, з підтримкою максимального значення потужності» Новітні технології в освіті, науці та виробництві: I Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція, м. Дніпро 18 квітня 2019 р. – с 61-64
- 6) M. Hanif, M. Ramzan, M. Rahman, M. Khan, M. Amin, and M. Aamir, "Studying Power Output of PV Solar Panels at Different Temperatures and Tilt Angles," ISESCO Journal of Science and Technology , Vol. 8, No. 14, pp. 9-12, 2012.
- 7) Mohamed Nfaoui, Khalil El-Hami, «Optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays: case of Settat city in Morocco», March 2018 International Journal of Ambient Energy 41(2):1-18 DOI: 10.1080/01430750.2018.1451375
- 8) E. Platonova, A. Toropov, A. Tulikov "Simulation of Energy Input to Solar Pane", 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), pp 133-137
- 9) Demirhan, Haydar, and Yasemin Kayhan Atilgan. "New horizontal global solar radiation estimation models for Turkey based on robust coplot supported genetic programming technique." Energy Conversion and Management (Elsevier {BV}) 106 (dec 2015): pp 1013-1023.
- 10) Остренко Д.О., та Колларов О.Ю. «Пошук екстремуму потужності фотоелектричного елемента шляхом методики розпізнавання образів штучними нейронними мережами», збірник «Наукові праці Донецького Національного Технічного Університету, серія: електротехніка і енергетика» №1(21)'2019, м. Покровськ, с 42-46;
- 11) Остренко Д.О., «Дослідження роботи штучної нейронної мережі, яка працює в енергосистемі з метою запобігання аварійних режимів», збірник «Наукові праці Донецького Національного Технічного Університету, серія: електротехніка і енергетика» №1(22)'2020, м. Покровськ, с 48-54;

REFERENCES

- 1) Ostrenko D., and Kollarov O. "Development of a neural network with MPPT controller characteristics", collection "Scientific works of Donetsk National Technical University, series: electrical engineering and energy" №1 (19) - 2 (20) '2018, Pokrovsk, pp. 23-27;
- 2) Patrapalli Durga Venkata Lakshmi, Make Madhu Manikya Kumar, Dasari Maharshi, Sornapudi Durga Prasad, "Solar power output with optimum tilt angle using Matlab", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 05 Issue: 04 | Apr-2018, pp 1131-1139
- 3) Manoj Kumar Sharma, Deepak Kumar, Sandeep Dhundhara, Dipesh Gaur and Yajvender Pal Verma "Optimal Tilt Angle Determination for PV Panels Using Real Time Data Acquisition", Global Challenges 2020, 4, Published by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim pp 12.

- 4) Onur Yemenici; Muhammed Osman Aksoy, «Numerical Study of Wind Loads on A Solar Panel at Different Inclination Angles», 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), Budapest, Hungary, 20.09.2018, pp 406-409
- 5) Ostrenko D., and Kollarov O. "Modeling the photovoltaic power plant, with the support of maximum power" The latest technologies in education, science and industry: I International Scientific and Technical Internet Conference, Dnipro April 18, 2019 -, p 61 -64
- 6) M. Hanif, M. Ramzan, M. Rahman, M. Khan, M. Amin, and M. Aamir, "Studying Power Output of PV Solar Panels at Different Temperatures and Tilt Angles," ISESCO Journal of Science and Technology , Vol. 8, No. 14, pp. 9-12, 2012.
- 7) Mohamed Nfaoui, Khalil El-Hami, «Optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays: case of Settat city in Morocco», March 2018 International Journal of Ambient Energy 41(2):1-18 DOI: 10.1080/01430750.2018.1451375
- 8) E. Platonova, A. Toropov, A. Tulikov "Simulation of Energy Input to Solar Pane", 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), pp 133-137
- 9) Demirhan, Haydar, and Yasemin Kayhan Atilgan. "New horizontal global solar radiation estimation models for Turkey based on robust coplot supported genetic programming technique." Energy Conversion and Management (Elsevier {BV}) 106 (dec 2015): pp 1013-1023.
- 10) Ostrenko D., and Kollarov O. "Search for the power extremum of a photovoltaic element by image recognition techniques by artificial neural networks", collection "Scientific works of Donetsk National Technical University, series: electrical engineering and energy" №1 (21) '2019, Pokrovsk, pp. 42-46;
- 11) Ostrenko D., "Study of the artificial neural network operating in the power system to prevent emergencies", collection "Scientific works of Donetsk National Technical University, series: electrical engineering and energy" №1 (22) '2020, Pokrovsk, p. 48-54;

Надійшла до редколегії 24.11.2020

Рецензент: Нікіфоров А. П.

D. OSTRENKO, O. KOLLAROV

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Analysis of the influence of the angle of inclination of solar panels on the operation of the grid using renewable energy sources. When considering the operation of the solar panel and performing modeling of its operation in [1], such input parameters as the level of solar insolation (the amount of light coming to the SP) and the value of the outside temperature on the solar panels themselves were taken into account. However, such an important parameter as the angle of inclination of the solar panels was not taken into account in such modeling. The value of this parameter takes into account, of course, the level of solar insolation, because the level of light that enters the JV directly depends on the angle at which they are located. However, it has not been considered that sensors (or luxmeters) for measuring illumination may be located at an angle other than the angle of inclination of the solar panel or, more importantly, the solar panels themselves due to their design features may not receive enough solar radiation. can take into account light sensors. This possibility exists at an angle of inclination close to zero, ie at dawn and sunset. This article is designed to take into account the influence of the angle of inclination of solar panels through the use of empirical dependencies and to test the theoretical foundations that have been formed in previous articles [1-4]. This article demonstrates the practical significance of taking into account the value of the angle of inclination of solar panels in the calculations of the photovoltaic plant. To do this, we first analyzed the state of the issue and the available methods of changing the angle of inclination in the operation of the electrical network with photovoltaic panels. Secondly, the influence of the geometric arrangement of the panels was taken into account when constructing the mathematical model. Studies have concluded that the optimal method of controlling the angle of inclination of photovoltaic panels is its seasonal change. After all, the application of this method increases the power output of RES with an average of 35% in summer and 10% in winter compared to fixed panels and does not require additional and sometimes very expensive equipment compared to the dynamic change of angle during the day. Further use of the proposed method will bring the values obtained during the simulation to the practical ones obtained when working with the installation.

Keywords: *electrical network, solar panels, tilt angle, maximum power, power supply, data collection, simulation, photoelectric electricity.*