

*О. М. МОРОЗ, О. О. МИРОШНИК, А. О. ПАВЛОВ, О. А. САВЧЕНКО, М. Ю. ТОБЕРТ*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГЕНЕРАЦІЮ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Інтенсивний розвиток мережевих сонячних електростанцій призводить до значних проблем управління та надійності роботи електричних систем країни, внаслідок стохастичного характеру погодних явищ, таких як хмарність, інтенсивність опадів, туман та інші. Тому прогнозування генерації сонячними електростанціями є важливим питанням як підвищення надійності роботи електричної системи країни, так і підвищення економічної ефективності функціонування сонячних електростанцій за рахунок зменшення штрафів за небаланси електричної енергії. Проведено експериментальні дослідження визначення впливу природних факторів, таких як кут сонця над горизонтом, температури фотоелектричних модулів, сонячної радіації, забрудненості поверхні модулів, кількості опадів та туману на генерацію мережевої сонячної електростанції потужністю 2,4 МВт, яка розміщена в Харківській області України. В результаті дослідження встановлена чітка залежність між активною потужністю сонячної станції, сонячною радіацією, ультрафіолетовим індексом та температурою поверхні фотоелектричного модуля. Встановлено характер зміни сонячної радіації впродовж 12 місяців спостережень, мінімальна сонячна радіація  $200 \text{ Вт/м}^2$  зафіксована у грудні, максимальна сонячна радіація біля  $1200 \text{ Вт/м}^2$  спостерігалась у червні. На основі статистичних даних отримані залежності для визначення різниці температури поверхні сонячних панелей і температури повітря у ясний день в залежності від годинної генерації сонячної електростанції. Встановлено, що генерація сонячної електростанції при 100 % хмарності складає від 20 до 28 % у порівнянні з генерацією у ясні дні. Значний вплив на генерацію сонячної електростанції має забрудненість поверхні фотоелектричних модулів та їх очищення в залежності від інтенсивності та кількості опадів. Значний вплив на генерацію має туман, що зменшує генерацію на 50 %. Отримані графіки питомої генерації (відношення годинної генерації сонячної електростанції, в перерахунку на температуру сонячних панелей  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , до середньогодинного кута сонця над горизонтом), використання яких допоможе визначити генерацію сонячної електростанції для кожної години впродовж дня. Для підвищення точності прогнозування генерації графіки питомої генерації поділені на два проміжки: перша та друга половини дня. Аналіз графіків питомої потужності дозволяє стверджувати, що питома генерація змінюється впродовж року, що пояснюється різною температурою повітря, вмістом пари в повітрі та товщиною шару повітря, через який проходять сонячні промені, в залежності від розміщення сонця над горизонтом.

**Ключові слова:** сонячна електростанція, фактори впливу, фотоелектричний модуль, сонячна радіація, питома генерація, середньогодинна температура, середньогодинний кут сонця.

*А. Н. МОРОЗ, А. А. МИРОШНИК, А. А. ПАВЛОВ, А. А. САВЧЕНКО, М. Ю. ТОБЕРТ*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА ГЕНЕРАЦИЮ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Интенсивное развитие сетевых солнечных электростанций приводит к значительным проблемам управления и надежности работы электрических систем страны вследствие стохастического характера погодных явлений, таких как облачность, интенсивность осадков, туман и другие. Поэтому прогнозирование генерации солнечных электростанций является важным вопросом как повышения надежности работы электрической системы страны, так и повышения экономической эффективности функционирования солнечных электростанций за счет уменьшения штрафов за небалансы электрической энергии. Проведены экспериментальные исследования определения влияния природных факторов, таких как угол солнца над горизонтом, температуры фотоэлектрических модулей, солнечной радиации, загрязненности поверхности модулей, количества осадков и тумана на генерацию солнечной электростанции мощностью 2,4 МВт, расположенной в Харьковской области Украины. В результате исследования установлена четкая зависимость между активной мощностью солнечной станции, солнечной радиацией, ультрафиолетовым индексом и температурой поверхности фотоэлектрического модуля. Установлен характер изменения солнечной радиации в течение 12 месяцев наблюдений, минимальная солнечная радиация  $200 \text{ Вт/м}^2$  зафиксирована в декабре, максимальная солнечная радиация около  $1200 \text{ Вт/м}^2$  наблюдалась в июне. На основе статистических данных получены зависимости для определения разности температуры поверхности солнечных панелей и температуры воздуха в ясный день в зависимости от часовой генерации солнечной электростанции. Установлено, что генерация солнечной электростанции при 100 % облачности составляет от 20 до 28 % по сравнению с генерацией в ясные дни. Значительное влияние на генерацию солнечной электростанции оказывает загрязненность поверхности фотоэлектрических модулей и их очистка в зависимости от интенсивности и количества осадков. Значительное влияние на генерацию оказывает туман, что уменьшает генерацию на 50 %. Получены графики удельного поколения (отношение часового поколения солнечной электростанции, в пересчете на температуру солнечных панелей  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , к среднечасовому углу солнца над горизонтом), использование которых поможет определять генерацию солнечной электростанции для каждого часа в течение дня. Для повышения точности прогнозирования генерации графики удельного поколения разделены на два промежутка: первая и вторая половины дня. Анализ графиков удельной мощности позволяет утверждать, что удельное поколение изменяется в течение года, что объясняется разной температурой воздуха, содержанием пара в воздухе и толщиной слоя воздуха, через который проходят солнечные лучи, в зависимости от расположения солнца над горизонтом.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, факторы воздействия, фотоэлектрический модуль, солнечная радиация, удельная генерация, среднечасовая температура, среднечасовой угол солнца.

*О. МОРОЗ, О. МИРОШНИК, А. ПАВЛОВ, О. САВЧЕНКО, М. ТОБЕРТ*

## **EXPERIMENTAL STUDIES OF FACTORS OF INFLUENCE ON SOLAR GENERATION POWER PLANTS**

Intensive development of grid-connected solar power plants leads to significant problems of management and reliability of the country's electrical systems, due to the stochastic nature of weather phenomena, such as clouds, rainfall, fog and others. Therefore, forecasting the generation of solar power plants is an important issue as improving the reliability of the country's electrical system and improving the economic efficiency of solar power plants by reducing fines for imbalances in electricity. Experimental studies have been conducted to determine the influence of natural factors, such as the angle

© О. М. Мороз, О. О. Мірошник, А. О. Павлов, О. А. Савченко, М. Ю. Тоберт, 2021

of the sun over the horizon, temperature of photovoltaic modules, solar radiation, contamination of module surfaces, precipitation and fog on the generation of 2.4 MW solar power plant located in Kharkiv region of Ukraine. The study found a clear relationship between the active power of the solar station, solar radiation, ultraviolet index and the surface temperature of the photovoltaic module. The nature of changes in solar radiation during 12 months of observations was established, the minimum solar radiation of 200 W/m<sup>2</sup> was recorded in December, the maximum solar radiation of about 1200 W/m<sup>2</sup> was observed in June. Based on statistical data, the dependences for determining the difference between the surface temperature of solar panels and the air temperature on a clear day depending on the hourly generation of the solar power plant are obtained. It is established that the generation of a solar power plant at 100 % cloud cover is from 20 to 28 % compared to the generation on clear days. Contamination of the surface of photovoltaic modules and their cleaning depending on the intensity and amount of precipitation has a significant impact on the generation of a solar power plant. Fog has a significant effect on lasing, which reduces lasing by 50 %. Graphs of specific generation (ratio of hourly generation of solar power plant, in terms of solar panel temperature 25 °C, to the average hourly angle of the sun above the horizon), which will help determine the generation of solar power plant for each hour during the day. To increase the accuracy of generation forecasting, the specific generation graphs are divided into two intervals: the first and second half of the day. Analysis of specific generation graphs suggests that the specific generation varies throughout the year due to different air temperatures, air vapour content and the thickness of the layer of air through which the sun's rays pass, depending on the location of the sun above the horizon.

**Keywords:** solar power plant, factors of influence, photovoltaic module, solar radiation, specific generation, average hourly temperature, average hourly angle of the sun.

**Вступ.** У зв'язку з кліматичними змінами та постійним зростанням споживання енергетичних ресурсів однією з основних цілей діяльності ООН на період до 2030 р. є «забезпечення загального доступу країн до сучасних енергетичних послуг, подвоєння частки відновлюваних джерел енергії у світовому енергетичному балансі та подвоєння глобальних темпів підвищення енергоефективності». [1]. Одним із рішень щодо проблеми глобального потепління та задоволення дедалі більшого попиту на електроенергію є встановлення «чистіших» джерел видобутку енергії, таких як сонячні електростанції (СЕС).

Згідно офіційних даних International Renewable Energy Agency від 4 квітня 2021 р., загальні потужності СЕС у світі у 2020 році зросли на 21,6 % – до 714 ГВт. Зокрема, всі європейські країни (в тому числі країни, які не входять до ЄС) у 2020 р. збільшили потужності СЕС на 14,5 % – до 163,5 ГВт. За показником загальної потужності (7,33 ГВт) Україна посідає в Європі 6 місце, поступаючись лише таким галузевим лідерам як-от Німеччина (53,8 ГВт), Італія (21,6 ГВт), Іспанія (14 ГВт), Франція (11,7 ГВт) та Нідерланди (10,2 ГВт). За темпами зростання галузі сонячної енергетики у 2020 р. Україна знаходиться на 4-му місці з показником +23,5 % [2].

Сьогодні розвиток сонячної енергетики в Україні знаходиться на стадії, яку Європа пройшла 7–10 років тому, а у порівнянні з Німеччиною сонячна енергетика України відстає на 13 років, хоча темпи генерації електричної енергії СЕС в Україні постійно зростають. З 2015 до 30 листопада 2021 року встановлена потужність СЕС України збільшилася з 359,1 до 6226,2 МВт, тобто зросла більш ніж у 17 разів [3].

В аналізі Міністерства енергетики та захисту довкілля України у 2019 році [4] було відмічено, що однією із технічних проблем використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) є низька точність прогнозу виробництва на СЕС і вітрових електростанціях (ВЕС), в Україні середня похибка прогнозування виробництва електроенергії на добу наперед складає біля 35 %. В законі України «Про ринок електроенергії» [5] встановлено, що частка відшкодування гарантованому покупцю суб'єктами господарювання, які входять до складу балансуєвої групи гарантованого покупця та здійснюють продаж електричної енергії, виробленої з альтернативних

джерел енергії на об'єктах електроенергетики, встановлена потужність яких перевищує 1 МВт, за «зеленим» тарифом або аукціонною ціною, вартості врегулювання небалансу гарантованого покупця становить: з 1 січня 2021 р. – 50 %; з 1 січня 2022 р. – 100 %.

Тому необхідність розроблення ефективної системи для короткотермінового погодинного прогнозування обсягів електроенергії, що генерується СЕС та режимів їх роботи, є дуже актуальною.

Дослідженням факторів впливу на генерацію СЕС присвячена значна кількість робіт [6–9]. Прогноз генерації СЕС базується на прогнозованих погодних даних [6], ефективність прогнозних моделей значно покращується при використанні статистичних даних та даних погоди, що спостерігаються. Точність методів прогнозування потужності фотоелектричної енергії покращується при попередній обробці вхідних даних [7]. За результатами кластерного аналізу встановлено, що найбільш впливовими факторами на генерацію активної потужності є радіація на поверхні землі, температура навколишнього середовища, вологість та швидкість вітру [8]. Більш перспективним, у порівнянні з детермінованим підходом, є ймовірнісний підхід [9]. Одним із недоліків при складанні прогнозних моделей генерації СЕС є збитковість даних, які приводять до ускладнення моделей, а в деяких випадках і до зменшення точності прогнозів [7]. Перспективним напрямком прогнозування генерації СЕС є використання штучних нейронних мереж з використанням програмного комплексу STATISTICA [10].

**Мета роботи.** Встановлення впливу природних факторів на генерацію СЕС для підвищення точності прогнозування генерації мережевих сонячних електростанцій.

**Виклад основного матеріалу.** Для з'ясування найбільш впливових факторів впливу на генерацію СЕС були проведені експериментальні дослідження впливу природних факторів на роботу СЕС потужністю 2,4 МВт, яка розміщена на площі у 4 га на території м. Мерефа Харківської області, географічні координати місця розташування СЕС такі: 49°48'07.2"N 36°05'06.0"E. Тип фотоелектричних модулів (ФЕМ) – монокристалічні модулі RISEN RSM72-6-365M-5BB (365 Вт) [11]. ФЕМ розміщені з

фіксованим кутом нахилу у  $27^\circ$  і мають орієнтацію у  $180^\circ$  на південь.

Визначенню оптимального кута нахилу ФЕМ передував аналіз річної генерації СЕС по визначенню максимальної генерації за допомогою Photovoltaic Geographical Information System [12].

Для перетворення постійного струму від ФЕМ у змінний трифазний струм синусоїдальної форми використовувалися інвертори Huawei SUN2000-60KTL-M0. Для передачі змінного струму напругою 0,4 кВ від інверторів СЕС до лінії електропередачі 35 кВ використовується комплексна трансформаторна підстанція (КТП) 35/0,4 кВ.

Для реєстрації параметрів погоди на території станції була встановлена метеостанція Meteoscanner 937PRO, яка забезпечувала вимірювання зовнішньої температури, атмосферного тиску, вологості зовнішнього повітря, напрямку та швидкості вітру, рівня ультрафіолетового (УФ) випромінювання, освітленості, кількості опадів, визначення точки роси. Передача даних в мережу та персонального комп'ютера (ПК) здійснювалась через WI-FI. Обробка даних метеостанції проводилась безпосередньо на ПК за допомогою програмного забезпечення Easy Weather IP, для цього ПК був підключений до тієї ж локальної (Wi-Fi) мережі, що і метеостанція. Моніторинг режимів роботи СЕС в режимі реального часу здійснювався за допомогою пристрою SmartLogger, який забезпечує отримання інформації у виді таблиць та графіків.

На основі експериментальних досліджень відслідковується чітка залежність між активною потужністю СЕС (рис. 1) і сонячною радіацією (рис. 2). Графік активної потужності (до 11:00) має спокійний характер, оскільки хмарність була відсутня, об 11:00 відбулося незначне збурення графіка внаслідок появи хмарності. Коливання активної потужності після 12:20 виникло внаслідок суттєвих змін хмарності.

Як видно з рис. 1 існує чітка залежність температури ФЕМ від активної потужності СЕС, хоча

спостерігається певне відставання зміни температури модулів від зміни генерації, що пояснюється тепловою інерцією нагрівання ФЕМ. На першій частині графіка (до 11:00) спостерігається «гладкий» графік активної потужності в той час як графік температури має незначні коливання, що пояснюється тим фактом, що датчик температури встановлений на одній панелі і зміна температури відбувається внаслідок затінення поверхні панелі окремими хмарками, а графік активної потужності є інтегрованою характеристикою СЕС.

Порівняння графіків активної потужності СЕС та УФ індексу (рис. 2) показує чітку залежність між цими параметрами. Був також проведений аналіз максимальної місячної сонячної радіації та УФ індексу, які вимірювались метеостанцією Meteoscanner 937PRO впродовж року, починаючи з вересня 2020 року по серпень 2021 року.

Результати досліджень максимальної сонячної радіації (максимальне значення, яке спостерігається протягом декількох хвилин при відсутності затінення від хмар та певній прозорості повітря) впродовж періоду спостережень наведені в табл. 1 та зображені на графіку (рис. 3). Максимальна сонячна радіація перевищує середнє значення сонячної радіації при ясній погоді на 20–25 %.

Як видно з таблиці та графіка спостерігається збільшення максимальної сонячної радіації та УФ індексу до червня, потім максимальна сонячна радіація і УФ індекс зменшуються. Спостерігається чіткий зв'язок між величиною максимальної сонячної радіації та УФ індексом.

Оскільки генерація ФЕМ залежить від її температури, для модулів RISEN RSM72-6-365M-5BV температурний коефіцієнт потужності складає  $-0,39\% / ^\circ\text{C}$  [11], тобто підвищення температури на  $1^\circ\text{C}$  призводить до зменшення потужності на 0,39 % від максимальної потужності і це складає 1,42 Вт, тому були проведені дослідження зміни температури поверхні модулів від середьогодинної генерації.



Рисунок 1 – Графіки залежності активної потужності та температури ФЕМ

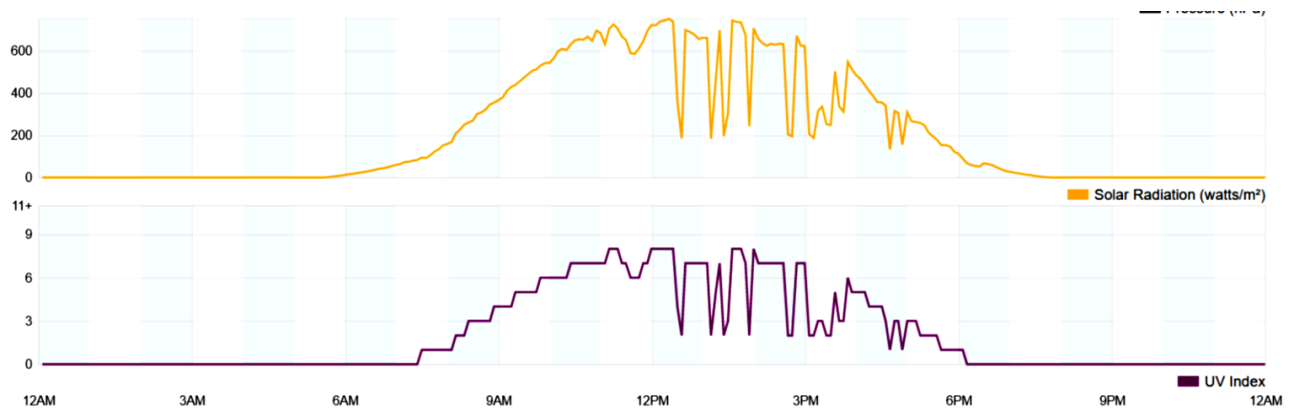


Рисунок 2 – Графіки сонячної радіації та УФ індексу, зафіксовані метеостанцією СЕС 22.08.2021 р.

Таблиця 1 – Максимальні значення сонячної радіації та УФ індексу

Дата	18.09.2020	07.10.2020	10.11.2020	28.12.2020	30.01.2021	15.02.2021	27.03.2021	16.04.2021	29.05.2021	07.06.2021	22.07.2021	11.08.2021
Макс. сонячна радіація, Вт/м <sup>2</sup>	841,5	628,9	589	202,9	289,7	409,9	785,4	960,5	1068,8	1138,7	970	904,9
УФ індекс	9	6	4	1	3	4	8	10	12	12	11	10

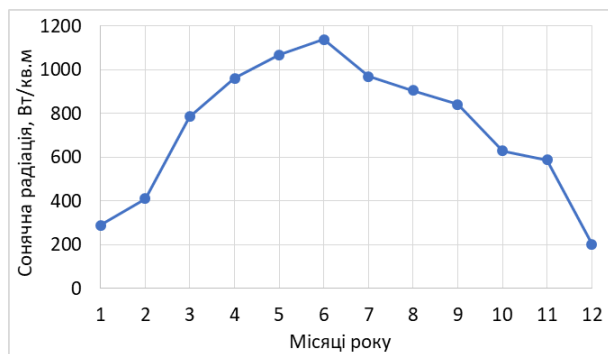


Рисунок 3 – Графік максимальної сонячної радіації

За результатами досліджень встановлена залежність перевищення середньогодинної температури панелей над середньогодинною температурою повітря (рис. 4 і 5), що дозволяє визначити температуру ФЕМ в залежності від генерації СЕС та температури оточуючого середовища. Графіки були побудовані з використанням таблиць Microsoft Excel, аналіз графіків показав, що ці залежності описуються лінійними рівняннями першого порядку.

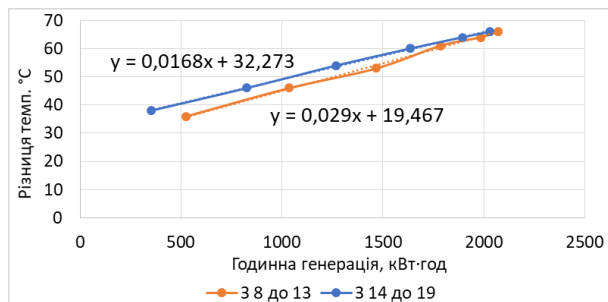


Рисунок 4 – Графіки різниці температур поверхні сонячних панелей відносно температури повітря у ясний день 08.07.21 р.

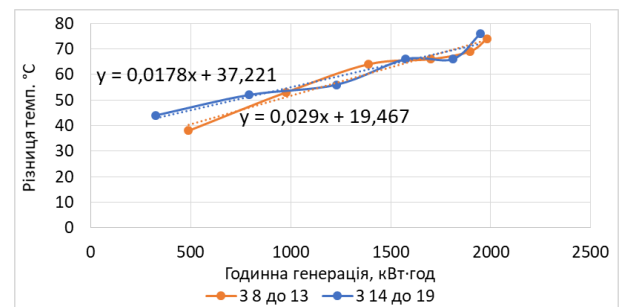


Рисунок 5 – Графіки різниці температур поверхні сонячних панелей відносно температури повітря у ясний день 14.07.21 р.

Аналіз графіків різниці температур показав, що більш точні залежності будуть отримані при групуванні даних з 8:00 до 13:00 (при підйомі сонця) та при його заході з 14:00 до 19:00. Так з графіків видно, що з 8:00 до 13:00 лінійна залежність однакова, а з 14:00 до 19:00 розбіжності різниці температур, розраховані за лінійними рівняннями  $y=0,0168x+32,273$  та  $y=0,0178x+37,221$ , де  $x$  – годинна генерація (кВт·год), в діапазоні генерації від 500 до 2000 кВт·год складає біля 10 %.

Генерація СЕС залежить від прямої та розсіяної сонячної радіації, а також від відбитої радіації від поверхні землі (альbedo). При безхмарній погоді основний вплив на генерацію СЕС має пряма радіація, а при 100 % хмарності генерація СЕС залежить від розсіяної радіації та альbedo [13]. Аналіз даних генерації СЕС показав, що вплив розсіяної радіації та альbedo на генерацію СЕС складає від 10 до 30 % в залежності від типу та товщини ярусів хмар. Активна потужність СЕС при 100 % хмарності визначалась за результатами досліджень графіків активної потужності у дні коли спостерігались години 0 та 100 % хмарності. У якості прикладу проведено аналіз активної

потужності СЕС 01.08.2021 р. (рис. 6). Об 11:00 спостерігалась 100 % хмарність і активна потужність була біля 400 кВт, відповідно питома активна потужність в перерахунку на температуру ФЕМ 25 °С, при куті сонця 52,1° була 8,1 кВт/град. О 12:30 спостерігалось чисте небо і активна потужність була біля 2000 кВт, відповідно питома активна потужність в перерахунку на температуру сонячних панелей 25 °С, при куті сонця 57,44° була 40,25 кВт/град. Таким чином при 100 % хмарності активна потужність СЕС складає 20 % від потужності при ясному небі, тобто внесок розсіяної сонячної радіації в генерацію СЕС складає біля 20 %.

На рис. 7 і 8, у якості прикладів, наведені графіки активної потужності та згенерованої електричної електроенергії на 21 вересня та 18 листопада 2020 року. Графіки від 21 вересня були отримані при ясній погоді, а графіки від 18 листопада – при 100% хмарності. Так активна потужність СЕС 18.11.2020 р. об 11 годині, що відповідає куту сонця над горизонтом 20°41', становила 250 кВт, а потужність станції 21.09.2020 р. о 8:45, що відповідає такому ж куту сонця, становила 900 кВт. Тобто активна потужність при 100 % хмарності становить 28 % від потужності у ясний день. Значний вплив на генерацію СЕС має забруднення поверхні фотоелектричних панелей, яке виникає внаслідок осідання пилу та екскрементів птахів (рис. 9 і 10).



Рисунок 6 – Графіки залежності активної потужності та температури ФЕМ 1.08.2021 р.

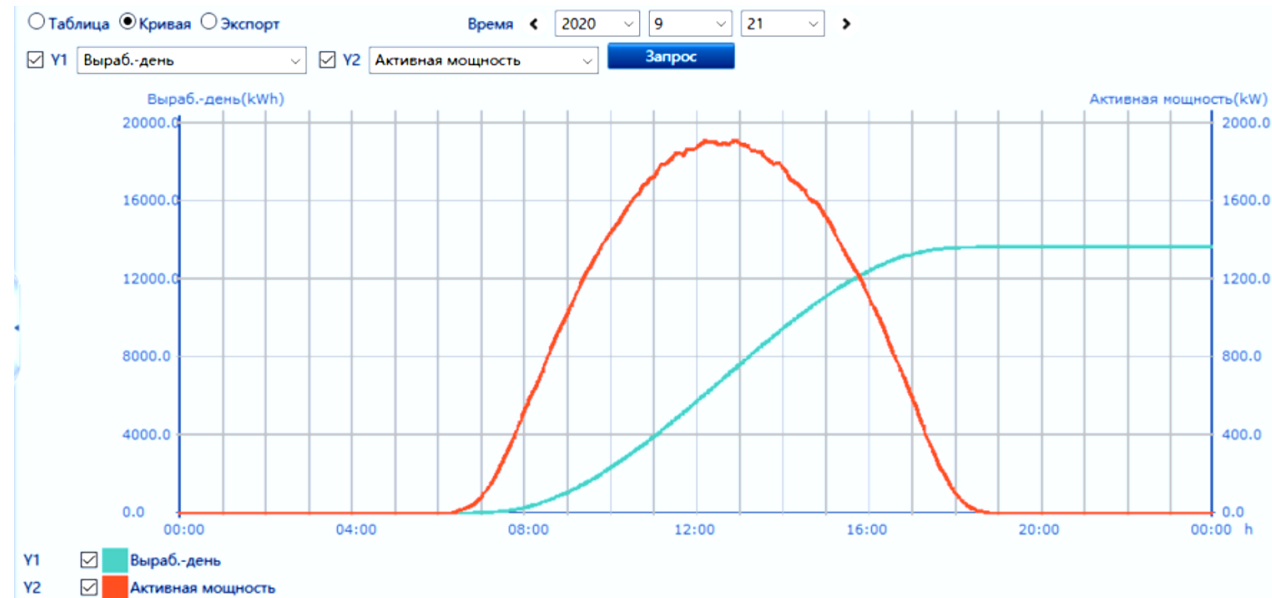


Рисунок 7 – Графіки активної потужності та згенерованої електричної енергії СЕС 21.09.20 р.



Рисунок 8 – Графіки активної потужності та згенерованої електричної енергії СЕС 18.11.20 р.

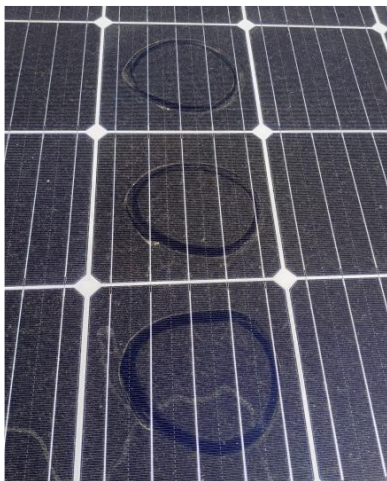


Рисунок 9 – Забруднення поверхні ФЕМ внаслідок осідання пилу



Рисунок 10 – Забруднення поверхні ФЕМ екскрементами птахів

Інтенсивність та товщина відкладення забруднень залежить від погодних умов, особливо від тривалості бездошового періоду, проведення сільськогосподарських робіт на полях, що близько примикають до території СЕС, спалювання відходів на присадибних ділянках даного населеного пункту, косіння та прибирання трави на території станції, популяції літаючих комах, а також інших чинників. Очищення поверхні ФЕМ залежить від кількості опадів та їх інтенсивності. Кількість опадів та їх інтенсивність вимірювалась за допомогою метеостанції (рис. 11). Інтенсивність опадів визначалась як кількість опадів, що випали за останні 10 хвилин (наприклад, кількість опадів за останні 10 хвилин 1,2 мм, тоді інтенсивність опадів  $1,2 \text{ мм} \cdot 6 = 7,2 \text{ мм/год}$ ).

Значний вплив на генерацію СЕС мають такі природні фактори як туман. На рис. 12 приведено графік генерації СЕС в туманний день при 100 % хмарності, коли погодинна генерація зменшилась майже на 50 % (при питомій активній потужності 6 кВт/град) у порівнянні з генерацією у день 100 % хмарності але при відсутності туману (рис. 13).

Для аналізу питомої генерації (відношення годинної генерації СЕС, в перерахунку на температуру сонячних панелей  $25^\circ\text{C}$ , до середньогодинного кута сонця над горизонтом) були вибрані ясні дні 8 і 14 липня та 16 та 28 серпня 2021 року. Середньогодинний кут сонця над горизонтом визначався за допомогою сервісу [14], генерація визначалася за допомогою пристрою SmartLogger. Результати експериментальних досліджень оброблені за допомогою табличного процесора Microsoft Office Excel (рис. 14 і 15). Для підвищення точності апроксимації результатів експериментальні дані були поділені на два проміжки, з 7:00 до 13:00 та з 14:00 до 19:00.

Отримані залежності описуються зі значною точністю (достовірність апроксимації  $R^2 > 0,99$ ) поліноміальними функціями другого ступеню (рівняння на графіках мають той же колір, що і графічні

залежності). Для визначення фізичних факторів, що впливали на питому генерацію, був проведений аналіз кількості та інтенсивності опадів, які призводили до очищення поверхні модулів. природного очищення поверхні ФЕМ залежить від кількості та інтенсивності

випадання опадів. Аналіз графіків питомої генерації СЕС 8 та 14 липня (рис. 14 і 15) не виявив суттєвої різниці, що дає можливість стверджувати, що за цей період не відбулось суттєве забруднення поверхні модулів.

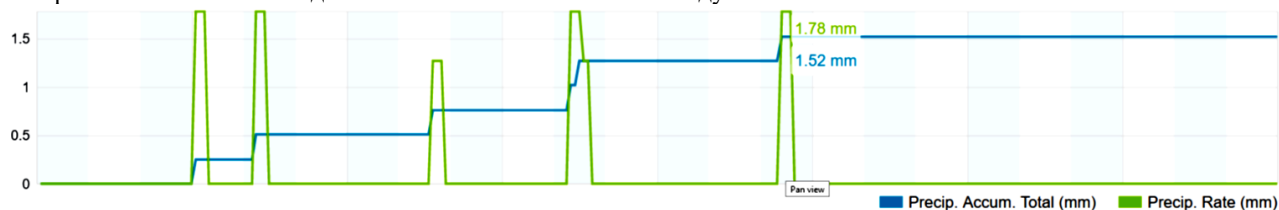


Рисунок 11 – Графіки інтенсивності та кількості опадів на території СЕС 10.12.2021 р.



Рисунок 12 – Графіки активної потужності та генерації СЕС в туманний день при 100% хмарності

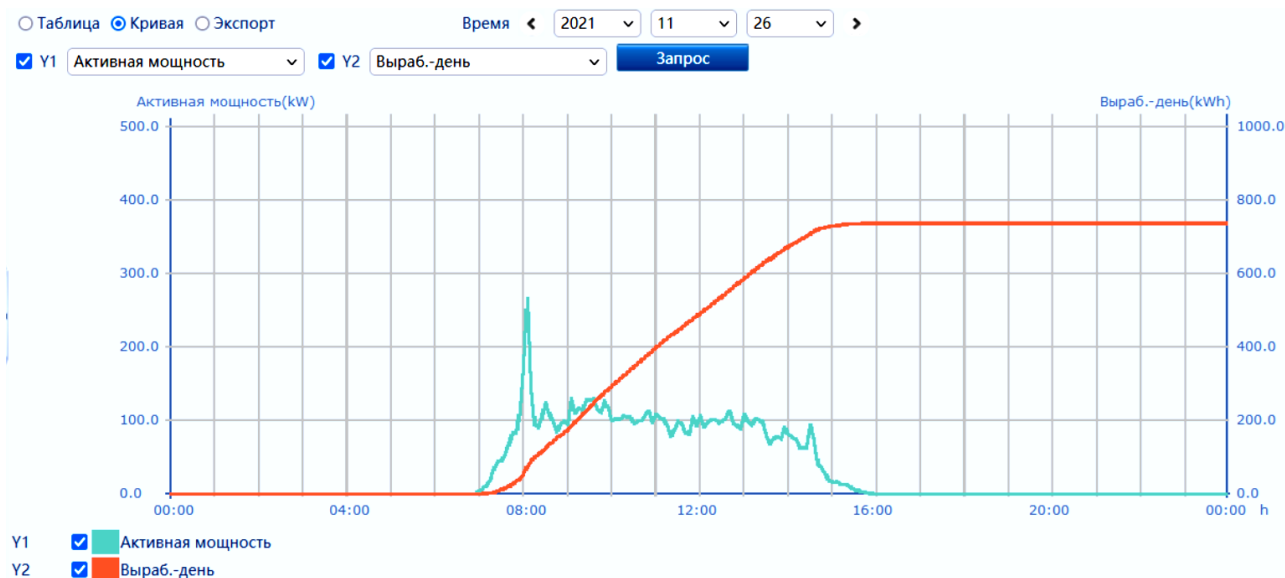


Рисунок 13 – Графіки активної потужності та генерації СЕС при 100% хмарності

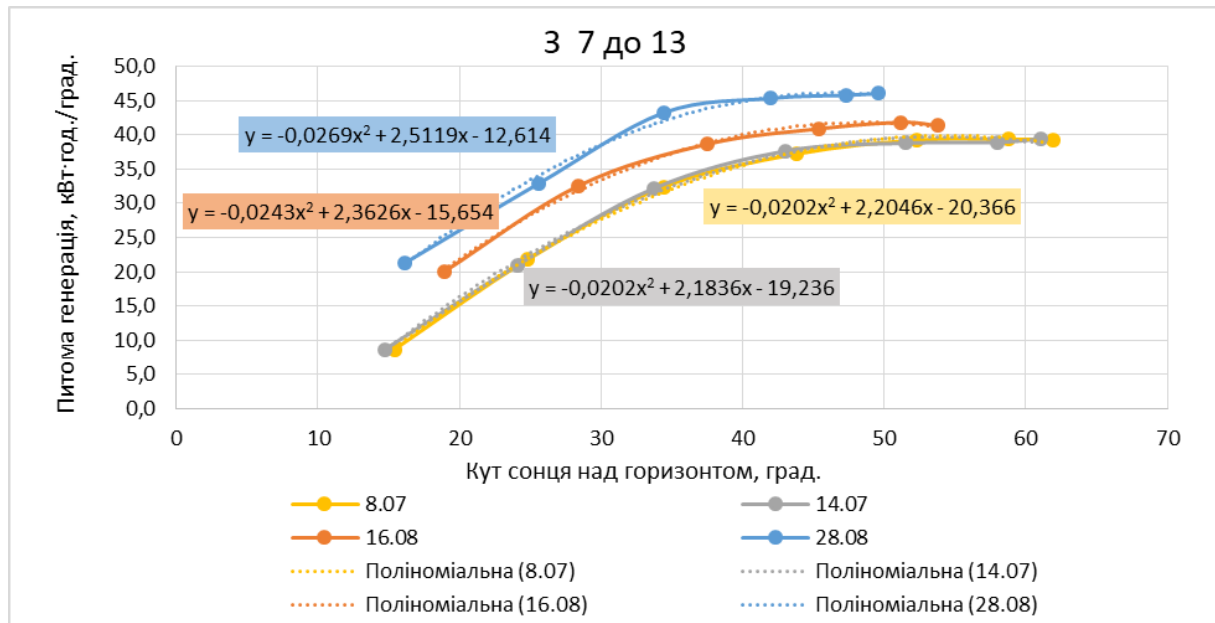


Рисунок 14 – Графіки питомої генерації СЕС з 7.00 до 13.00

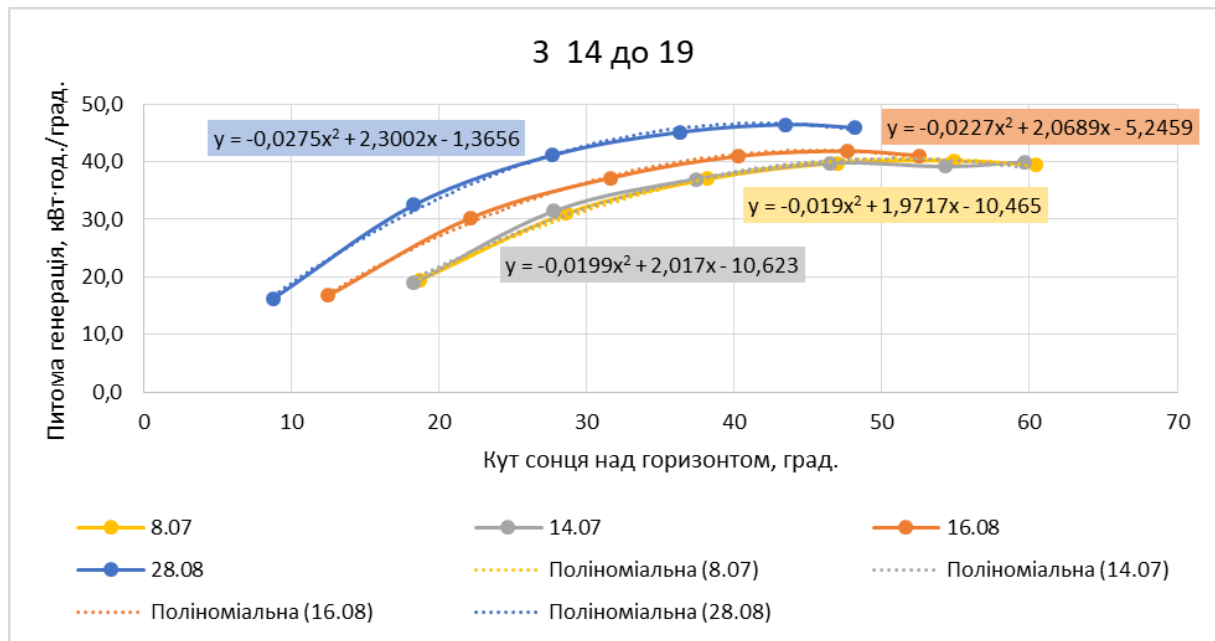


Рисунок 15 – Графіки питомої генерації СЕС з 14.00 до 19.00

З 14 липня по 16 серпня спостерігалось 4 дні з опадами (21.07.2021 випало 1,27 мм опадів, при інтенсивності 1,76 мм/год, 29.07.2021 р. випало 4,57 мм при інтенсивності 16,76 мм/год, 03.08.2021 випало 0,25 мм опадів, при інтенсивності 1,78 мм/год, 07.08.2021 р. випало 8,1 мм при інтенсивності 25,9 мм/год). Загальна кількість опадів склала 14,19 мм, що не мало суттєвого впливу на очищення поверхні ФЕМ.

В проміжку між двома ясними днями з 16 серпня по 28 серпня спостерігались інтенсивні опади (19.08.2021 випало 73 мм опадів, при інтенсивності 132 мм/год; 20.08.2021 р. – 10,92 мм при інтенсивності 25,9 мм/год; 26.08.2021 р. – 5,59 мм при інтенсивності 10,9 мм/год; 27.08.2021 р. – 12,95 мм при інтенсивності

22,86 мм/год). Загальна кількість опадів за цей період склала 102,44 мм, що мало суттєвий вплив на очищення поверхні ФЕМ, що підтверджується збільшенням питомої генерації (рис. 14 і 15). Аналіз графіків питомої потужності дозволяє стверджувати, що питома генерація змінюється впродовж року, що пояснюється різною температурою повітря, вмістом пари в повітрі та товщиною шару повітря, через який проходять сонячні промені, в залежності від розміщення сонця над горизонтом.

**Висновки.** Генерація СЕС має стохастичний характер внаслідок мінливих факторів погоди, тому прогнозування генерації СЕС є важливим питанням, як для зменшення штрафних санкцій, внаслідок небалансу електроенергії, і відповідно підвищення



економічної ефективності СЕС, так і для забезпечення надійної роботи об'єднаної енергетичної системи країни, оскільки встановлена потужність СЕС постійно збільшується, як і частка генерації електроенергії. Для прогнозування генерації СЕС важливими чинниками, що впливають на точність прогнозування, є статистичні дані сонячної радіації для місцевості, де встановлена СЕС, так і фізичні моделі впливу погодних та місцевих факторів на генерацію. Встановлені залежності перевищення середньогодинної температури панелей над середньогодинною температурою повітря дозволяють визначити температуру ФЕМ в залежності від генерації СЕС та температуру оточуючого середовища, а відповідно і підвищити точність прогнозування генерації. Встановлені значення питомої генерації СЕС, приведеної до температури 25 °С, в ясну погоду та при 100 % хмарності дозволяють прогнозувати генерацію в залежності від хмарності. Аналіз приведених значень питомої генерації дозволяє встановлювати ступінь забрудненості поверхні ФЕМ і відповідно більш точно прогнозувати генерацію СЕС.

### Список літератури

1. Дячук О., Чепелев М., Подолець Р., Трипольська Г. та ін. *Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року*. Київ: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. 88 с.
2. *Cisolar 2021: Україна увійшла до ТОП 5 європейських країн за темпами розвитку сонячної енергетики*. URL: <https://ecolog-ua.com/news/cisolar-2021-ukrayina-uviyshla-do-top-5-yevropeyskyh-krayin-za-tempamy-rozvytku-sonyachnoyi> (дата звернення: 18.11.2021).
3. *Встановлена потужність енергосистеми України на 11/2021*. URL: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/> (дата звернення: 03.12.2021).
4. *Розвиток відновлюваної енергетики: стан, виклики, пропозиції до вирішення*. URL: <https://cutt.ly/7jbxr5e> (дата звернення: 16.11.2021).
5. Про ринок електричної енергії України: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. *Відомості Верховної Ради*. 2017. №27–28. Ст. 312.
6. Sangrody H., Sarailoo M., Zhou N., Tran N., Motalleb M., Foruzan E. Weather forecasting error in solar energy forecasting *IET Renewable Power Generation*. 2017, vol. 11, no. 10, pp. 1274–1280. doi: 10.1049/iet-rpg.2016.1043.
7. Malvoni M., De Giorgi M. G., Congedo P. M. Forecasting of PV power generation using weather input data. *Energy Procedia*. 2017, vol. 126, pp. 651–658. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.293.
8. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В., Дідиченко С. С. Аналіз метеопараметрів для погодинного прогнозування виробітку електроенергії фотовольтаїчними електростанціями на добу наперед. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. № 1 (6). С. 27–31.
9. Киселева С. В., Лисицкая Н. В., Фрид С. Е. Прогнозирование выработки солнечных станций и фотоэлектрических установок: основные подходы и результативность. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2020. № 7–18. С. 24–42. doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.24-43.
10. O. Savchenko et al. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 137–140. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009.
11. *Сонячна панель RISEN RSM72-6-365M PERC монокристал*. URL: <https://eco-tech.com.ua/ua/p840116230-solnechnaya-panel-risen.html> (дата звернення: 16.11.2021).
12. *Photovoltaic Geographical Information System*. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#MR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR) (дата звернення: 08.11.2021).
13. Perez-Astudillo D., Bachour D. DNI, GHI and DHI ground measurements in Doha, Qatar. *Energy Procedia*. 2014, vol. 49, pp. 2398–2404. doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.254.
14. *Время восхода и захода солнца в Мерефе*. URL: <https://voshod-solnca.ru/sun/%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B0> (дата звернення: 11.11.2021).

### References (transliterated)

1. Dyachuk O., Chepelyev M., Podolets R., Trypol'ska H. et al. *Perekhid Ukrainy na vidnovlyuvanu enerhetyku do 2050 roku* [Ukraine's transition to renewable energy by 2050]. Kyiv, ART KNYHA Publ., 2017. 88 p.
2. *Cisolar 2021: Ukrayina uviyshla do TOP 5 yevropeyskykh krayin za tempamy rozvytku sonyachnoyi enerhetyky* [Ukraine in top 5 European countries for solar energy development]. Available at: <https://ecolog-ua.com/news/cisolar-2021-ukrayina-uviyshla-do-top-5-yevropeyskyh-krayin-za-tempamy-rozvytku-sonyachnoyi> (accessed 18.11.2021).
3. *Vstanovlena potuzhnist' enerhosityemy Ukrainy na 11/2021* [Installed capacity of the IPS of Ukraine values as of 11/2021]. Available at: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/> (accessed 03.12.2021).
4. *Rozvytok vidnovlyuvanoi enerhetyky: stan, vyklyky, propozyitsiyi do vyrishennya* [Renewable energy development: status, challenges, proposals for solutions]. Available at: <https://cutt.ly/7jbxr5e> (accessed 16.11.2021).
5. Pro ryнок elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy [On the Electricity Market]: Law of Ukraine on 13.04.2017 № 2019 VIII. *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*. 2017. № 27–28. Art. 312.
6. Sangrody H., Sarailoo M., Zhou N., Tran N., Motalleb M., Foruzan E. Weather forecasting error in solar energy forecasting *IET Renewable Power Generation*. 2017, vol. 11, no. 10, pp. 1274–1280. doi: 10.1049/iet-rpg.2016.1043.
7. Malvoni M., De Giorgi M. G., Congedo P. M. Forecasting of PV power generation using weather input data. *Energy Procedia*. 2017, vol. 126, pp. 651–658. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.293.
8. Lezhnyuk P. D., Komar V. O., Kravchuk S. V., Didichenko Ye. S. Analiz meteoparametriv dlya pohodynnoho prohnozuvannya vyrobittku elektroenerhiyi fotovol'tayichnykh elektrostantsiyamy na dobu napered [Meteoroparameter analysis for prognosis of electricity development of photo-voltage electrical power plant day ahead]. *Enerhetyka ta komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi v APK*. 2017, no. 1 (6), pp. 27–31.
9. Kiseleva S. V., Lisitskaya N. V., Frid S. E. Prognozirovanie vyrabotki solnechnykh stantsiy i fotoelektricheskikh ustanovok: osnovnye podkhody i rezul'tativnost' [Photovoltaic Power Forecasting: Basic Approaches and Features]. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2020, no. 7–18, pp. 24–42. doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.24-43.
10. O. Savchenko et al. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021, pp. 137–140. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009.
11. *Sonyachna panel' RISEN RSM72-6-365M PERC monokrystal* [Solar panel RISEN RSM72-6-365M PERC monocrystal]. Available at: <https://eco-tech.com.ua/ua/p840116230-solnechnaya-panel-risen.html> (accessed 16.11.2021).
12. *Photovoltaic Geographical Information System*. Available at: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#MR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR) (accessed 08.11.2021).
13. Perez-Astudillo D., Bachour D. DNI, GHI and DHI ground measurements in Doha, Qatar. *Energy Procedia*. 2014, vol. 49, pp. 2398–2404. doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.254.
14. *Vremya voskhoda i zakhoda solnitsa v Merefe* [Sunrise and sunset times in Merefa]. Available at: <https://voshod-solnca.ru/sun/%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B0> (accessed 11.11.2021).

Надійшла (received) 05.12.2021

**Мороз Олександр Миколайович (Мороз Александр Николаевич, Oleksandr Moroz)** – доктор технічних наук, Державний біотехнологічний університет, професор кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8520-9211>; e-mail: moroz.an@ukr.net.

**Мірошник Олександр Олександрович (Мирошник Александр Александрович, Oleksandr Miroshnyk)** – доктор технічних наук, професор, Державний біотехнологічний університет, завідувач кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6144-7573>; e-mail: omiroshnyk@ukr.net.

**Павлов Андрій Олександрович (Павлов Андрей Александрович, Andrii Pavlov)** – аспірант кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9943-4084>; e-mail: andriy\_pavlov@me.com.

**Савченко Олександр Анатолійович (Савченко Александр Анатольевич, Oleksandr Savchenko)** – кандидат технічних наук, Державний біотехнологічний університет, доцент кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6401-0852>; e-mail: sanoa@ukr.net.

**Тоберт Михайло Юрійович (Тоберт Михаил Юрьевич, Mikhail Tobert)** – магістрант кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-1156>; e-mail: tobert.mikhail@gmail.com.