

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження особливості роботи сонячних електростанцій при
різних зовнішніх забрудненнях»

Виконав

(підпис)

Сергій СКОРИНА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЕТЕС 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

Олена ДОВЖИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу

Сергій СКОРИНА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження особливості роботи сонячних електростанцій при різних зовнішніх забрудненнях.
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Чепіжний Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент.
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: паспортні дані сонячних панелей та додаткового обладнання сонячних електростанцій, правила улаштування електроустановок, правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1 Аналіз дослідження забрудненості сонячних панелей та постановка проблеми. 2 Теоретичний розділ. 3 Особливості роботи сонячних панелей при запиленості. 4 Охорона праці. 5 Економічне обґрунтування. Висновки та пропозиції. Список використаної літератури. Додатки.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Сергій СКОРИНА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Збір інформації про особливості дослідження забруднення сонячних панелей	до 02.08.2025 р.	
2	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 1. Аналіз дослідження забрудненості сонячних панелей та постановка проблеми»	до 30.08.2025р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 2. Теоретичний розділ»	до 19.09.2025 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 3. Особливості роботи сонячних панелей при запиленості»	до 03.10.2025 р.	
8	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
9	Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
10	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
11	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
12	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
13	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Сергій СКОРИНА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Скорина Сергій Анатолійович «Дослідження особливості роботи сонячних електростанцій при різних зовнішніх забрудненнях».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025

В роботі виконано аналіз типів сонячних панелей, що є найбільш поширеними Сумській області. Також проаналізовано особливості використання сонячних електростанцій та коливання їх потужності при використанні в регіоні.

Визначено основні типи забруднення сонячних панелей та їх запилення, а також проведено аналіз основних видів впливу на ефективність роботи сонячної електростанції. Визначено відмінність між забрудненням та деградацією фотоелементів сонячних панелей. Проаналізовано основні існуючі методи визначення рівня забруднення сонячних панелей та обрано найбільш ефективний для проведення дослідження. Для обраного методу запропоновано математичну модель проведення аналізу рівня забруднення сонячних панелей.

Результати дослідження дають можливість отримати показники, що мають найбільшу ефективність при визначенні рівня забруднення, що в подальшому використовуються для визначення періодичності очищення сонячної панелі. Отримані результати свідчать, що найбільший вплив на рівень забруднення сонячної панелі мають саме температура, струм на потужність. Інші показники вольтамперної характеристики сонячної панелі є малоефективними для прийняття рішення проведення очищення сонячної панелі.

Виконано аналіз заходів з охорони праці та наведено економічну оцінку впливу забруднення сонячної панелі на рівень виробітку нею електроенергії.

Ключові слова: сонячна панель, забруднення, запилення, інтенсивність світла, очищення, струм, напруга, температура, сонячні промені, електроенергія.

ABSTRACT

Skorina Serhii Anatoliiovych «Investigation of the specificity of the operation of solar power plants under various external problems».

Qualification for a master's degree in electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics for the lighting program «Electrical power engineering, electrical engineering and electrical engineering» with specialties 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics». Sumy National Agrarian University, Sumi, 2025.

The work contains an analysis of the types of solar panels, which are the most widespread in the Sumy region. The peculiarities of the vicinity of sleepy power plants and the severity of their pain during vicorstasis in the region were also analyzed.

The main types of congestion of solar panels and their sawing have been identified, and an analysis of the main types of impact on the efficiency of the operation of a solar power plant has been carried out. The difference between obstructions and degradation of photocells of solar panels was determined. The main methods for determining the level of obstruction of the solar panels have been analyzed and the most effective method has been selected for further investigation. For this method, a mathematical model was developed to analyze the level of congestion of dormouse panels.

The results of the investigation make it possible to identify indicators that may be most effective at a given level of obstruction, which can then be used to determine the frequency of cleansing of the skin panel. The results show that the greatest impact on the level of congestion of the solar panel may be the temperature itself, the source of tension. Other indicators of the current-voltage characteristics of the solar panel are ineffective for deciding on cleaning the solar panel. An analysis of the energy consumption has been carried out and an economical assessment has been made of the flow of contaminated solar panels into the generation of electricity.

Key words: solar panel, obstruction, sawing, light intensity, purification, flow, voltage, temperature, solar energy, electricity.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.....	10
1.1 Аналіз поширеності типів сонячних панелей на території Сумської області.....	10
1.2 Загальний опис впливу різноманітних погодних умов на ефективність роботи сонячних панелей.....	12
Висновок до розділу.....	18
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1 Аналіз основних методів визначення запиленості сонячних панелей.....	19
2.2 Математичне моделювання процесу запилення сонячної панелі та зміну генерації електричної енергії.....	23
2.3 Обрана комбінована математична модель з адаптивною оптимізацією.....	25
Висновки до розділу.....	28
3 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ЗАПИЛЕНОСТІ.....	29
3.1 Загальні положення проведення дослідів.....	29
3.2 Постановка дослідів та обладнання.....	31
3.3 Отримані результати вимірювань.....	33
Висновок до розділу.....	36
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	37
Висновки до розділу.....	39
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	40
Висновки до розділу.....	42
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	45
ДОДАТКИ.....	48

ВСТУП

Актуальність теми. Сьогодні в Україні доволі великого поширення набувають сонячні електростанції. Особливого поширення та розвитку вони отримують в областях де діють значні відключення електроенергії в результаті бойових дій. Однією з таких областей є Сумська область.

В Сумській області досить широко розповсюджені сонячні електростанції значної потужності, що працюють на продаж електроенергії в мережу регіону. Ще більш розповсюджені невеликі сонячні електростанції малої потужності. Найбільша кількість сонячних електростанцій в Сумській області мають невелику потужність та використовуються для підтримання освітлення в будинках чи квартирах, а також використовуються для основного електрообладнання.

Зараз вже найбільш достовірно відомо, що доволі сильний вплив на ефективність роботи сонячних панелей має температурний режим навколишнього середовища. Але при цьому фактично не враховують такий важливий показник, як засміченість поверхні сонячної панелі. Засмічення сонячної панелі доволі часто приводить до виникнення шару пилу, що зменшує кількість сонячного опромінення до фотоелемента. Основними видами забруднень, що попадають на сонячні панелі розміщені на території Сумської області є: бруд, пил, листя різних порід дерев та пташиний послід.

Особливо необхідно зазначити, що в результаті бойових дій запиленість та засміченість повітря Сумської області значно збільшилась, що в сукупності приводить до осідання пилу на всіх поверхнях в тому числі і поверхні сонячних панелей.

Очистка сонячних панелей від пилу є доволі важливим процесом, оскільки при цьому потрібно враховувати велику чисельність факторів. Основним з яких є фізико-хімічний склад забруднення, оскільки це може впливати на ефективність процесу очищення та сприяти процесу пошкодження захисного покриття самої панелі. Враховуючи такі особливості захисних покриттів

сонячних панелей, проводити їх постійну очистку недоцільно, адже це може призвести до значного пошкодження покриття і повністю вивести панель з ладу.

Проблемою забруднення сонячних електростанцій займається доволі велика кількість вчених, адже сонячні електростанції набувають доволі великого поширення. Для оцінки рівня забруднення сонячної електростанції використовують різноманітні методи аналізу рівня засміченості. Дані методи ґрунтуються на особливостях роботи сонячних електростанцій.

Виходячи з такої постановки задачі, дослідження особливостей впливу запиленості на коефіцієнт корисної дії сонячної електростанції та на показники її потужності є доволі актуальним, а отже потребує подальших досліджень.

Аналіз стану наукової розробки проблеми. Наразі проблема забруднення сонячних панелей перебуває на етапі інтенсивної прикладної та фундаментальної розробки, що свідчить про її визнання як критичного фактора для сталості та економічності фотоелектричної енергетики.

Мета та задачі досліджень. Основною метою роботи є ефективно визначення рівня забруднення сонячних панелей в умовах Сумської області для реалізації ефективної періодичності процесу очищення панелей.

Для вирішення поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз основних факторів, що впливають на ефективність роботи сонячних панелей та визначити частку, яка припадає саме на забруднення;
- провести аналіз основних методів визначення рівня забруднення панелей та обрати найбільш ефективний метод для проведення дослідження;
- визначити вплив забрудненості сонячних панелей на їх ефективність роботи та виконати аналіз економічних показників роботи сонячної електростанції.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є вольтамперні характеристики роботи сонячних панелей, які працюють при різних ступенях забруднення в умовах Сумської області.

Предмет дослідження. Основним предметом дослідження є величина рівня забруднення сонячних панелей що регламентує необхідність проведення очищення сонячної електростанції.

Завдання дослідження. Проведення аналізу залежності параметрів сонячної панелі від основних параметрів навколишнього середовища Сумської області з врахуванням особливостей їх забруднення.

Методи дослідження. Основними методами, що використовуються в даному дослідженні є експериментальні, математичні та аналітичні методи. При проведенні подібних досліджень обов'язковою умовою є збір максимальної кількості даних та створення необхідних для аналізу і порівняння баз даних.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота містить 5 розділів, 2 додатки, 5 таблиць, 12 рисунків, 27 джерел.

1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сонячні електростанції при роботі мають доволі велику кількість внутрішніх та зовнішніх факторів, що мають на них негативний вплив. Запиленість та засміченість сонячних панелей також є однією з основних проблем, що призводять до зменшення їх ефективності. Основною ідеєю боротьби з засміченістю та запиленістю сонячних панелей є проведення їх періодичного очищення. Періодичність очищення сонячних панелей не повинна бути доволі частою, адже це призводить до пошкодження прозорого захисного покриття. При цьому очищення панелей повинно бути також ефективним.

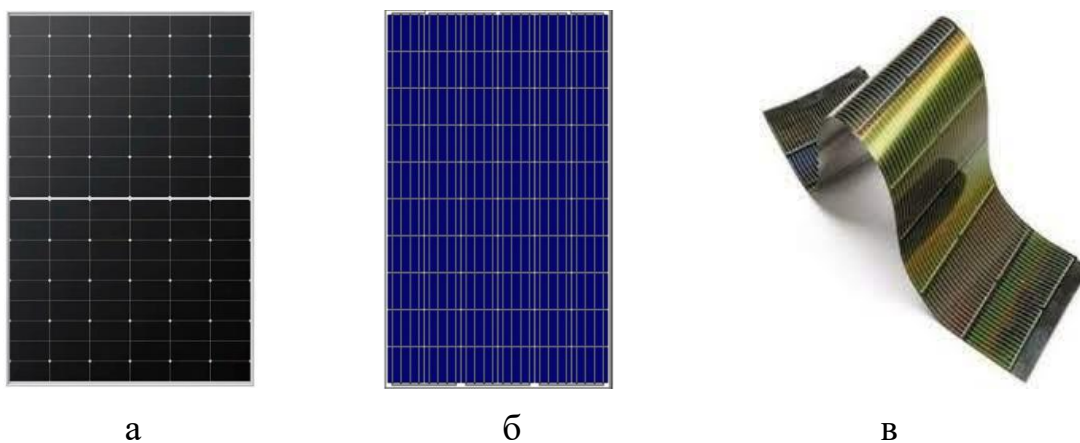
Виходячи з цього необхідною умовою подальшого аналізу забрудненості сонячних панелей є необхідність аналізу всіх факторів негативного впливу на їх ефективність роботи. При цьому необхідно визначити частку зменшення ефективності роботи сонячних панелей що припадає саме на забруднення чи запилення.

1.1 Аналіз поширеності типів сонячних панелей на території Сумської області

Ринок виробників сонячних панелей є доволі великим, що дає різноманітність пропозицій по ціновій політиці, якісним показникам, потужності, конфігурації та іншим показникам.

На ринку Сумської області є три види сонячних панелей, що є не менш розповсюдженими на території всієї України. Це такі види, як: монокристалічні, полікристалічні, а також тонкоплівкові. При цьому найменш розповсюдженими є тонкоплівкові оскільки мають ряд особливостей, що обмежують їх використання в сонячних електростанціях різних потужностей.

Необхідно також зазначити, що монокристалічні та полікристалічні сонячні панелі на сьогодні випускаються фактично габаритами в межах: ширина – 99...140 см; довжина – 169...250 см.



а – монокристалічні; б – полікристалічні; в – тонкоплівкові
Рисунок 1.1 – Загальний вигляд різних видів сонячних панелей

Однакові габаритні розміри даних видів сонячних панелей жодним чином не дають однакової їх потужності. Найбільш потужними панелями, що мають найвищий ККД є монокристалічні панелі. Значення їх ККД знаходиться на рівні 17...25 %. Полікристалічні сонячні панелі при цьому мають дещо нижче значення показника ККД, що знаходиться в межах 15...18 %.

Ще однією перевагою монокристалічних панелей є термін їхньої служби, що знаходиться в межах 20...25 років. При цьому основною перевагою полікристалічних сонячних панелей є простота технології їх виробництва та відповідно її дешевизна, що знижує їх вартість.

В Сумській області найбільшого розповсюдження набули все ж монокристалічні сонячні панелі, що є більш дорого вартісними, але при цьому мають більшу ефективність. Їх ефективність полягає в більшій кількості вироблених кВт від одиниці їх площі.

Зазначимо, що тонкоплівні сонячні панелі мають дуже низький ККД – 9...13 %, а також мають низький термін служби порівняно з іншими видами.

Додатково є і інша тенденція, яка свідчить що, монокристалічні сонячні панелі встановлюють більше для домашнього використання, а для побудови сонячних електростанцій використовують полікристалічні сонячні панелі.

При проведенні вибору сонячних електростанцій для різних об'єктів зазвичай користуються певними показниками та вимогами, що обмежені

площею для монтажу сонячних панелей, потужністю сонячної електростанції, температурою навколишнього середовища, фінансовими можливостями та строком служби електростанції.

Виходячи з такої постановки проблеми для подальшого аналізу впливу забрудненості, пропонується обрати фактично два види (монокристалічні та полікристалічні) сонячні панелі, через їх найбільшу розповсюдженість. Але враховуючи значне розповсюдження сонячних електростанцій для домашнього (прибудинкового) використання потрібно зробити більший акцент на монокристалічні сонячні панелі.

1.2 Загальний опис впливу різноманітних погодних умов на ефективність роботи сонячних панелей

Для визначення частки впливу забрудненості (запиленості) поверхні сонячних панелей від загального показника втрат ефективності їх роботи, необхідно чітко розуміти розподіл впливу різноманітних погодних умов на ефективність роботи сонячної електростанції.

Оскільки сонячні панелі напряму контактують з навколишнім середовищем, то на ефективність їх роботи впливає значна кількість показників та параметрів, в тому числі і різноманітність погодних умов Сумської області. Загалом врахування всіх цих параметрів дозволяє в значній мірі точно визначити ефективність роботи сонячної електростанції та значення її потужності. Тож далі розглянемо особливості всіх факторів.

Сонячна радіація та сонячне світло. Сонячні панелі використовуються в різних умовах сонячного освітлення. Для умов Сумської області існує фактично два типи сонячного освітлення, що характеризуються:

- ясним небом;
- хмарністю та похмурістю.

Оптимальними умовами для роботи сонячних електростанцій є ясне небо з високим значенням сонячної радіації. При виборі найбільш ефективного кута

розміщення панелей до сонячних променів можна досягти максимального значення продуктивності з максимальною генерацією електричної енергії.



Рисунок 1.2 – Вибір оптимального кута нахилу сонячних панелей

Оптимальний кут розміщення сонячних панелей полягає в тому, щоб кут між сонячними променями, що падають на неї був перпендикулярним до самої поверхні сонячної панелі. Значення кута розміщення сонячних панелей протягом року є різним (рис. 1.2), а отже стаціонарно сонячні панелі в межах Сумської області встановлюють на кут в межах 40...50° від горизонтальної поверхні.

Подібне обмеження стаціонарного встановлення сонячних панелей призводить до зменшення потужності сонячної електростанції під одним кутом протягом року. В такому випадку величина зниження ККД панелей знаходиться в межах 1...5 % протягом року.

Враховуючи хмарність та похмурість клімату Сумської області можна сказати, що доволі велика кількість днів протягом року мають значну хмарність. При цьому подібні погодні умови призводять до значного зменшення ефективності сонячних панелей, що становить 10...25 % від їх потужності в яскравий день з максимальною кількістю сонячного світла.

Температура. Також доволі велике значення на роботу сонячних панелей має і температура навколишнього середовища. Сонячні панелі є доволі чутливими до температурних змін. Чим вища температура навколишнього середовища та панелі, тим її ефективність є меншою. Подібний ефект виникає через те, що збільшення температури збільшує опір в сонячних елементах, що

призводить до зменшення потоку електронів і в подальшому зменшує вихідну потужність панелі.

Більшість сонячних панелей мають значення температурного коефіцієнту близько $-0,5\%$ в розрахунку на 1°C . Це говорить про те, що при кожному з підвищень температури навколишнього середовища та панелі на 1°C від нормальних умов ефективність сонячної панелі падає на $0,5\%$. Нормальні температурні умови експлуатації більшості сонячних панелей становлять 25°C .

Зменшити вплив температури на сонячні панелі можна забезпечивши належний рівень їх вентиляції, а в жарких кліматичних умовах необхідно забезпечувати панелі системою їх охолодження.

При проведенні охолодження сонячних панелей важливим фактором є уникнення «шокового» охолодження фотоелементів. Побідний ефект може виникнути за умови різкого охолодження через миття панелей від забруднення.

Низькі температури навпаки можуть сприяти підвищенню ефективності роботи сонячних панелей. Вплив низьких температур призводить до зменшення опору в сонячних елементах і підвищує потік електронів, а відповідно підвищує ефективність роботи сонячних панелей.

Сніговий покрив та лід. Необхідно також врахувати особливість Сумської області, що пов'язані з морозом та значною засніженістю регіону. Подібні явища можуть призвести до блокування сонячних променів при проходженні їх до фотоелементів сонячної панелі. Подібний ефект наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Вплив сніжного покриву та морозу на сонячні панелі

Необхідно зазначити особливість роботи сонячних панелей в Сумській області, де в результаті значних снігових опадів виникає великий шар снігу на панелях. В момент незначного підвищення температури взимку, сніжний покрив починає танути та спливати з панелей. Але не завжди за день сніговому покриву вдається повністю розтанути. В результаті чого, в нічний час, сніг, що розтанув замерзає утворюючи щільну льодяну кірку, яка міцно прилипає до панелі. На рисунку 1.3 подібний ефект спостерігається на нижніх краях сонячних панелей, де розташувались такі льодяні шапки.

Систематичність даного підходу протягом тривалості морозного періоду сприяє повному закриттю сонячної панелі, а також «молодий» сніг, що випадає забруднює площу сонячної панелі. При цьому ефект від снігового покриву на сонячній панелі призводить майже до повного закриття сонячних променів та в результаті до відсутності виробітку нею електроенергії.

Необхідно зазначити, що в зимовий період часу в Сумській області важливо систематично проводити очистку сонячних панелей від забруднення снігом, інієм та ін.

Вітер. Помірний вітер на території де встановлені сонячні панелі допомагає їх охолодженню, а відповідно підвищує їх ефективність роботи. При цьому помірний вітер зазвичай підтримує температуру панелі в оптимальному режимі. Інший ефект від помірного вітру полягає в тому, що він сприяє видаленню пилу та засміченості різноманітним сміттям, а отже сприяє підтриманню їх чистоти.

Сильні вітри мають більше негативний вплив оскільки можуть призвести до пошкодження загальної конструкції сонячної електростанції. Вирішення даної проблеми потребує систематичного огляду всіх конструкцій сонячної електростанції.

Дощ та вологість. Дощ, так як і вітер сприяє природному очищенню сонячних панелей. При цьому дощ здатен видаляти пил, більшість пташиного посліду, бруд та інші забруднення з сонячних панелей, що призводить до підвищення ефективності їх роботи.

Сумська області відповідно до кліматичного розташування в достатній мірі забезпечена дощовими опадами та їх ефективною періодичністю, що дозволяє витратити менше часу на очистку сонячних електростанцій.

Високий рівень вологості, що виникає в певні періоди в Сумській області призводить до виникнення корозії конструкції, різноманітних роз'ємів та інших елементів сонячної електростанції.

Пил та інші забруднення. Пил, бруд та інші забруднення сонячних панелей мають накопичувальний ефект та сприяють значному зниженню ефективності роботи сонячних панелей. Ефект від пилу та забруднення сонячних панелей схожий на закриття панелі сніговим чи навіть льодяним покривом. Загалом запилення та забруднення сонячних панелей може призвести до зниження ефективності їх роботи на 10...20 %.

Необхідно також зауважити, що електромагнітні процеси, які проходять в сонячних панелях сприяють їх намагнічуванню. Даний ефект притягує велику кількість намагнічених частинок пилу. В результаті для боротьби з ефектом запилення сонячних панелей необхідною умовою є періодичне їх очищення.

Ще однією негативною особливістю Сумської області є активні бойові дії на її території, постійні пожежі та велика кількість різноманітної техніки на дорогах. Все це приводить до значного запилення та забруднення повітря.

Забруднення повітря сприяє загальному зменшенню кількості сонячної радіації в регіоні, що проходить до сонячних панелей. Також це призводить до значного підняття в повітря великої кількості пилу. Раніше подібні ефекти спостерігались в більшій мірі в містах, а станом на сьогодні це притаманно фактично всій Сумській області.

Ефект затінення та сезонні зміни. Доволі часто розміщення сонячних електростанцій розміщується поруч з різними перешкодами (деревами, будинками, кущами та ін.). Навіть часткове затінення сонячної панелі призводить до значного зменшення її ефективності.

Більшою проблемою в Сумській області є сезонні зміни. Найбільша кількість сонячної радіації потрапляє на сонячні панелі в літні та частково весняні місяці. Відповідно дані місяці є найбільш продуктивними.

В осінні, зимові та частково в весняні періоди кількість сонячної радіації є невеликою, а отже і ефективність роботи сонячних панелей є невеликою. Приблизний графік виробітку електроенергії сонячними електростанціями в Сумській області з використанням прикладних даних наведено на рисунку 1.4.

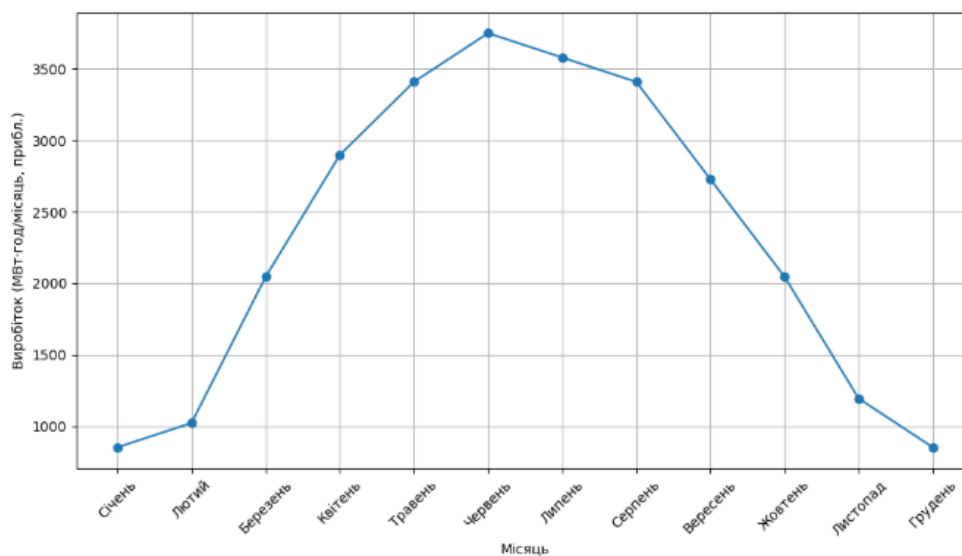


Рисунок 1.4 – Приблизний місячний графік виробітку електроенергії сонячною електростанцією в Сумській області з використанням прикладних даних

Необхідно звернути увагу на доволі проблемні питання в літні місяці по температурі навколишнього середовища, адже останні роки доволі суттєво спостерігається підвищення температури, значно більшої за 25°C. Виходячи з цього станом на 2025 рік відбувались стрибки температури до 30°C. В ці періоди спостерігався спад виробітку електроенергії сонячними панелями в межах 2...3% через значний нагрів.

Додаткова інформація по особливостям виробітку електроенергії, втратам та реалізацією підходу до очищення сонячних панелей та сонячної електростанції в цілому наведено в додатках до диплому.

Висновок до розділу

Сонячні електростанції є найбільш розповсюдженими в Сумській області для домашнього та промислового використання. Найбільш популярними є монокристалічні та полікристалічні сонячні панелі, що мають різні розміри та потужність.

Загалом основною проблемою, що потребує вирішення є забруднення різного роду пилом, що виникає в результаті руху транспортних засобів, військових дій та інших особливостей регіону. Вирішення проблеми запиленості сонячних панелей в Сумській області частково вирішується очищенням їх дощами та потоками вітру.

Необхідно зазначити, що на ефективність роботи сонячних електростанцій впливає доволі велика кількість факторів, розглянутих в першому розділі. Зниження ефективності панелей в умовах сьогодення Сумської області фактично не досліджене, адже спостерігається зміна кліматичних умов та зростання запиленості різного походження.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Після розуміння, частки втрат виробітку електроенергії сонячної панелі, що припадає саме на забруднення чи запилення, то далі вирішують питання для реалізації визначення критичного моменту загального забруднення та подальшої необхідності проведення очищення сонячної панелі. Необхідною умовою є вибір оптимального методу для проведення замірів. При цьому необхідно провести загальний аналіз існуючих методів визначення рівня забрудненості та обрати найбільш доцільний для проведення подальших досліджень.

2.1 Аналіз основних методів визначення запиленості сонячних панелей

На території України, і в тому числі і на території Сумської області є сонячні електростанції різних форм власності, конфігурації та потужності. В результаті все більше спостерігається тенденція до приділення більшої уваги проблем з обслуговування сонячних електростанцій та особливостям їх експлуатації в Сумському регіоні.

Найбільш частою проблемою є визначення частоти очищення сонячних панелей від пилу та різноманітних забруднень. При цьому розумний підхід до очищення сонячних панелей полягає в теоретичному розрахунку періодичності очищення з врахуванням великої кількості зовнішніх та внутрішніх факторів. Саме такий підхід дозволяє якісно виконати очистку саме тих сонячних панелей, які найбільше потребують очистки від всієї електростанції.

В дослідженнях є розрахунки, що за умови рівномірного розподілення всього 4 см^3 забруднення (пилу, бруду та ін.) спостерігалось зниження ефективності роботи 1 м^2 сонячної панелі приблизно на 40 %. Подібне зниження в сукупності з іншими факторами, що описані в першому розділі дають сумарний ефект майже повної відсутності виробітку електроенергії сонячною електростанцією. Виходячи з цього необхідно виконувати очищення панелей, що матиме найбільшу ефективність в усіх аспектах їх роботи.

Зауважимо, що вирішення проблеми запилення сонячних електростанцій, що знаходяться в приватному користуванні можна вирішити простим поливанням їх струменем води. Але проблема постає більш глибоко для сонячних електростанцій, що мають значну площу сонячних панелей. При цьому просте поливання сонячних поверхонь веде до значних затрат води, але панелі при цьому можуть мати нерівномірність забруднення. В результаті, в такому випадку на перший план виходить економічність проведення очистки, а також час затрачений на очищення сонячних панелей електростанції. На рисунку 2.1 наведено загальний вигляд значного запилення сонячної електростанції.



Рисунок 2.1 – Запилення промислової сонячної електростанції

Ще однією проблемою є те, що при неправильному проведенні операції очищення можна вивести сонячну панель з ладу. Це може відбутись у випадку проведення очищення сонячної панелі при високій її температурі (в денний час коли сонячні панелі значно нагріті сонячними променями). В такій ситуації фотоелементи сонячної панелі отримують «температурний шок», пов'язаний з різкою зміною температури.

Виходячи з цього задача по очищенню сонячних панелей та визначенню моменту проведення даної операції виходять на перший план. Для цього проведемо основний аналіз методів визначення рівня забрудненості панелей.

В першу чергу очистка сонячних панелей стає більш економічно вигідною в момент, коли ціна очищення менше вартості виробленої електроенергії, що виробляється після виконання робіт по очищенню. Виходячи з цього визначення моменту необхідності очистки сонячних панелей є складним рівнянням з великою чисельністю факторів.

Окрім перерахованих вище факторів додатково враховують площу сонячних панелей, тривалість процесу очищення а також необхідність відключення станції від електричної мережі під час проведення очищення.

Загалом більшість сонячних електростанцій очищують в нічний час або в вечірній час, що дозволить зменшити втрати виробітку електроенергії. Виходячи з цього існує доволі велика кількість методів проведення аналізу забруднення сонячних панелей, а також доволі часто застосовуються різноманітні математичні моделі, що дають однозначну відповідь.

В більшості підприємств, що займаються виробітком електроенергії з використанням сонячних електростанцій, працівники покладаються на практичний досвід фахівців та спостереженні. Виходячи з цього пропонується більш детально ознайомитись з деякими методами визначення ступеню забрудненості сонячних панелей.

Метод порівняння вольтамперних характеристик (ВАХ). Даний метод є найбільш простим та найбільш дієвим порівняно з іншими методами. Він ґрунтується на тому, що реальні значення ВАХ порівнюються з ВАХ електростанції отриманими в момент введення її в експлуатацію. Необхідно зазначити, що при використанні даного методу категорично забороняється використовувати дані з проектної документації, через їх розрахунок з врахуванням фактично ідеальних умов для регіону.

Така особливість потребує проведення певної кількості тестів та дослідів при введенні сонячної електростанції в експлуатацію. Результати цих тестів використовують в подальшій оцінці ефективності роботи сонячної електростанції порівнюючи їх з отриманими даним забруднених панелей. В результаті роботи електростанції та проведення досліджень формується база

даних роботи сонячної електростанції в різних умовах протягом всього терміну експлуатації. Необхідно також врахувати, що найбільш точні дані можна отримати лише за умови однакових погодних умов з початковими (базовими) даними.

Даний метод також має і недолік, що полягає в тому, що він фактично не враховує процес деградації фото модулів або навіть вихід деяких з ладу. При цьому без корегування даних погрішність буде лише збільшуватись з часом експлуатації сонячних панелей.

Іншою проблемою даного методу є те, що він не враховує втрати при перетворенні електроенергії з постійного струму в змінний. Додатково до цього необхідно враховувати також похибку вимірювальних приладів, а отже отримані дані завчасно будуть мати похибку не менше $\pm 2\%$.

Метод тестового миття. Даний метод ґрунтується на порівнянні результатів роботи сонячної електростанції до очистки панелей та після на прикладі певної контрольної групи сонячних панелей.

Для реалізації даного методу обирають певну панель або групу панелей, що розміщені середині масиву панелей сонячної електростанції чи навіть декілька панелей розміщених в різних місцях електростанції. При цьому приймають розподілення загального забруднення сонячної електростанції приблизно рівним на всій її площі сонячної електростанції.

Далі обрані панелі вимірюють та очищують. Після очищення знову проводять вимірювання в приблизно однакових погодних умовах попереднього заміру. Проводячи порівняння отриманих результатів дає можливість визначення приросту генерації електричної енергії, а також провести оцінку необхідності очищення всієї сонячної електростанції.

Метод контрольної сонячної панелі. Даний метод полягає в тому, що для однієї сонячної панелі в масиві панелей сонячної електростанції проводиться періодичний чи навіть постійний контроль генерування електроенергії. Даний метод, як і попередній може також використовувати декілька панелей в різних частинах сонячної електростанції.

Відповідно до цього, зниження генерування електроенергії, що нижче певного рівня, буде сигналізувати про необхідність пошуку причин її зниження. При цьому одєю із причин подібного зниження може бути підвищена запиленість чи забрудненість панелей.

Термопарні піранометри. Даний метод ґрунтується на використанні термопарних піранометрів, що на сьогодні доволі часто використовуються при проведенні метеорологічних спостережень. Даний прилад дозволяє виміряти загальний потік сонячної енергії, що потрапляє на них, а отже, і на сонячні панелі. При цьому можна врахувати напрям та кут падіння сонячних променів на панелі, що значно підвищує ефективність вимірювання. Оскільки дані прилади мають широку спектральну чутливість, то вони можуть провести вимірювання всієї щільності сонячного потоку, що потрапляє на сонячну панель.

Отримані заміри дозволяють доволі легко спрогнозувати ефективність роботи сонячної панелі та порівняти її з фактичною роботою сонячної електростанції.

При проведенні досліджень доволі часто використовують поєднання різних методів, що дозволяє більш точно визначити рівень запиленості та необхідність проведення очищення сонячної електростанції. Виходячи з цього врахуємо цю особливість в дослідженнях забруднення сонячних панелей.

2.2 Математичне моделювання процесу запилення сонячної панелі та зміну генерації електричної енергії

Як вказувалось вище, є велика кількість методів, що реалізують процес визначення рівня забрудненості та запиленості сонячної панелі. При цьому в дослідженнях використовують комбінування методів для отримання більш якісних результатів оцінки рівня запиленості панелей, та здешевлять технологію оцінки.

Всі методи в кінцевому випадку зводяться до певного нескладного математичного моделювання загального процесу. Пропонується розглянути їх та навести особливості їх використання.

Одним, найбільш поширеним методом для аналізу є експоненційна модель діода. Даний діод є його трьохпараметровим еквівалентом. Для експоненційної моделі ВАХ мають вигляд певного рівняння:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V}{R_S} \quad (2.1)$$

де I_{ph} – згенерований струм фотоелементом;

I_0 – величина темного діодного значення струму;

n – значення фактора діода;

V_t – гіст тепловго характеру.

R_S – величина серійного опору.

При використанні даної моделі забруднення сонячних панелей впливає через зменшення величини I_{ph} , а також збільшення опору R_S .

Застосування даної математичної моделі має простоту інтерпретації для аналітичних рішень певних точок кривої ВАХ. Але дана модель має і значні недоліки, що пов'язані з чутливістю до шуму та необхідністю обмеження кількості параметрів аналізу ВАХ.

Доволі часто в дослідженнях зустрічається і використання моделі еквівалентного кола з використанням діоду та конденсатором. Інша назва даної моделі – Р-Н теорія. Вона включає певні параметри швидкодії та ємність (модульність), що виникає через зміну параметрів діоду під впливом забруднення.

Особливістю даної моделі є те, що вона гарно підходить до проведення динамічних вимірювань з можливою появою гіперболічних ефектів, що виникають під впливом забруднення.

Дана методика, на відміну від попередньої здатна краще відображати динаміку та час отримання відповіді, що відбувається в зв'язку з забрудненням. Але основною складністю даного методу є ускладнення підбору необхідних параметрів ВАХ.

Доволі розповсюдженою є модель з лінійною та квадратичною величиною поправки до згенерованого фотоелементом струму. Дана модель має вигляд рівняння наведеного нижче:

$$I = I_{ph}(1 - \alpha) - I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V}{R_S} \quad (2.2)$$

де α – поправочний коефіцієнт на зменшення фотовикористання, що виникає через забруднення.

Основною перевагою застосування даної математичної моделі є гнучкість, що виникає при незначних відхиленнях значень ВАХ. При цьому можуть виникати певні надлишкові ефекти при використанні моделі в складних умовах проведення досліджень.

Також додатково набули популярності математичні моделі, що враховують параметри ексердних діодів. Іншою назвою даної моделі є S-матриці або S-DIF. Дана модель працює в обхід існуючих підходів до визначення рівня забруднення через паразитні резистори.

При цьому дана модель є високоточною для визначення деградації фотоелементів та відповідно рівня забруднення сонячної панелі. Але основним недоліком є її складність та потреба в значній кількості даних для аналізу ВАХ.

2.3 Обрана комбінована математична модель з адаптивною оптимізацією

Всі вищенаведені математичні моделі дозволяють проводити аналіз з певними похибками. Найбільш часто використовують комбінації різних математичних моделей, що дозволяє отримати найкращий результат аналізу.

Для такої математичної моделі використовують побудову базової моделі, що ґрунтується на використанні трьохпараметрового еквіваленту діоду, що має певний серійний опір. Основними параметрами, що використовуються в даній

моделі є: I_{ph} , I_0 , n та R_S . При цьому параметр R_S може бути використаний в вигляді фіксованої величини.

Виходячи з обраних параметрів математичної моделі рівняння ВАХ матиме наступний вигляд:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V}{R_S} \quad (2.3)$$

Обов'язково при аналіз необхідно враховувати температуру V_t , значення якої можна визначити з рівняння:

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (2.4)$$

де k – температурний коефіцієнт;

T – величина температури панелі;

q – величина гісту для відповідного значення теплоти.

Виходячи з наведеної моделі визначення чутливості параметрів ВАХ до забруднення панелі мають вплив на всі параметри роботи панелі. При цьому основний вплив полягає:

- в зменшенні параметру I_{ph} , тобто зменшення площі світлового перетворення фотоелементів сонячної панелі;
- в збільшенні опору R_S , що полягає в погіршенні контактів сонячної панелі чи електростанції;
- у впливі на величина I_0 , в зв'язку з зміною параметрів діоду;
- у збільшенні величини n через виникнення неоднорідності поверхні сонячної панелі.

Для використання даної моделі необхідно виконувати постійне збирання даних ВАХ до загальної бази даних. Але початково потрібно отримати значення на чистій сонячній панелі та в подальшому отримати данні від забрудненої панелі для подальшого порівняння.

Для використання математичної моделі застосовуються певні індикатори забруднення, що характеризуються величинами:

- характер зниження величини максимального токового моменту (I_m);
- характер зменшення напруги за умови максимального значення потужності (V_{mp}, I_{mp});
- характер збільшення величини серійного опору (R_S);
- характер зміни значення діодного параметру (n).

Додатково при цьому використовують дельту параметрів від базових значень лінії, що враховує всі індикатори забруднення.

Проведення оцінки ВАХ виконують за відповідним алгоритмом. Він полягає в першочерговому зібранні даних ВАХ при різних умовах, як чиста сонячна панель, нагріта панель та відповідно забруднена. Також можна виконати певну комбінацію початкових параметрів ВАХ для отримання більшої бази даних.

Наступним кроком алгоритму проведення дослідження є підбір параметрів моделі для кожного з набору даних отриманих при попередніх вимірюваннях. При цьому використовують методи чисельного підбору чи певного неявного підбору.

Далі, згідно алгоритму проводять визначення величини різниці між параметрами:

$$\Delta I_{ph} = I_{ph}^{\text{чиста}} - I_{ph}^{\text{брудна}} \quad (2.5)$$

$$\Delta R_S = R_S^{\text{чиста}} - R_S^{\text{брудна}} \quad (2.6)$$

$$\Delta n = n^{\text{чиста}} - n^{\text{брудна}} \quad (2.7)$$

За необхідності можна провести розрахунки різниці і для інших параметрів необхідних для аналізу ВАХ.

Додатково для проведення аналізу обов'язковою умовою є визначення нормалізованого індексу рівня забруднення, що описується рівнянням:

$$IQ = \frac{\sqrt{(\Delta I_{ph})^2 + (\Delta R_s)^2 + (\Delta n)^2}}{M} \quad (2.8)$$

де M – значення масштабу для проведення аналізу площі сонячних панелей.

Подальшим кроком алгоритму є порівняння моделей за найкращою метрикою проведення вимірювань та далі виконати вибір моделі з оптимальним балансом між величиною точності даних та їх інтерпретованістю.

Необхідно зазначити, що при аналізі рівня забрудненості сонячних панелей необхідно виконувати постійне коригування бази даних з генерації, що дозволить зменшити вплив рівня деградації її фотоелементів.

Висновки до розділу

Проведення аналізу рівня забрудненості сонячних панелей є складним процесом, що визначається різними методами. При цьому найбільшої ефективності набуває комбінація цих методів дослідження. Комбінації різноманітних методів в основному ґрунтуються на отриманні ВАХ сонячної панелі при різних умовах її використання. В результаті порівняння з чистою панеллю отримуємо величину рівня забруднення сонячної панелі.

Загальною складністю використання даного методу є формування доволі значної бази даних для проведення порівняльного аналізу. При цьому виникає необхідність застосування математичних моделей аналізу. Обрана математична модель для проведення опису рівня забруднення дозволяє провести аналіз зі значною точністю отриманих результатів.

3 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ЗАПИЛЕНОСТІ

3.1 Загальні положення проведення досліджу

Оскільки основною метою проведення дослідження є визначення рівня забруднення чи запилення сонячної панелі на її працездатність та відповідно ефективність, першочерговою умовою є повне врахування всіх можливих параметрів впливу. Як було наведено вище таких параметрів є доволі велика кількість і вони можуть бути як внутрішні так і зовнішні. При цьому необхідно враховувати, що запилення чи забруднення сонячної панелі може бути як рівномірним так і нерівномірним. Цей ефект залежить від місцевості та великої кількості факторів навколишнього середовища, що перераховані в попередніх розділах.

Доволі важливим є дослідження впливу осідання пилу на ВАХ сонячної панелі, які дають можливість отримати найбільш повну характеристику для подальшого використання в аналізі особливостей деградації фотоелементів.

Нами проведені дослідження визначення втрат продуктивності сонячної панелі через запилення з використанням динамічного дослідження ВАХ панелі. При цьому нами враховано різний рівень та умови забруднення.

Додатково при дослідженнях нами враховано особливості сучасних умов Сумської області по температурі, рівню запиленості та інші параметри.

Зазначимо, що в подібних дослідках науковців зазначається, що запиленість сонячної панелі щомісячно здатна знижувати її продуктивність майже на 20 %. Ці дослідження враховували вітри, що дозволяють очищувати панелі до певного рівня.

При проведенні дослідження нами враховувалось забруднення (запилення) сонячної панелі до критичного рівня, що дасть можливість показати найбільший можливий рівень забруднення сонячної панелі. Нами не враховується дія твердих частинок на пошкодження покриття сонячної панелі.

Тверді частинки мають значний вплив на виробіток електричної енергії. Зразки пилю були зібрані для умов Сумської області. Для проведення дослідження було обрано сонячну панель розміром 1×1,64 м. Загалом осідання пилю на сонячну панель за 1 місяць наведено на рисунку 3.1. Також на даному рисунку враховано перекриття твердих частинок пилю на сонячні панелі та показано особливості часткового покриття пилом.

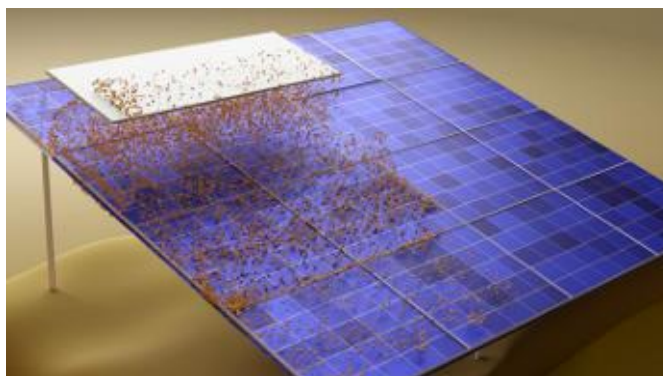


Рисунок 3.1 – Особливості осідання пилю на сонячні панелі

Необхідно зазначити, що в більшості досліджень зазначається необхідність проведення очищення сонячних панелей кожні 25...30 днів. При цьому спостерігалось збільшення виробітку електроенергії приблизно на 55% після кожного їх очищення. В процесі експлуатації більшу частину твердих частинок все ж таки здувають вітри, а от осідання забруднення від об'єктів промисловості, спалювання різного палива в котельнях, а також від військових дій за допомогою вітру не вдається позбутись. При цьому необхідно саме їх видаляти вчасно та з необхідною періодичністю.

Вибір способу очистки сонячних панелей в даних дослідженнях виконувати не планується. Він буде залежати від ряду факторів, в тому числі і від потужності сонячної електростанції (кількості сонячних панелей). Необхідно зазначити, що методи очистки сонячних панелей можуть бути ручними та автоматичними.

Автоматичні методи очистки в більшій мірі реалізуються на великих сонячних електростанціях через значну вартість обладнання для даного методу. Очистка ручним способом для умов Сумської області залишається найбільш

поширеним варіантом очищення оскільки переважна більшість сонячних електростанцій є невеликими та знаходяться у приватній власності домогосподарств регіону.

3.2 Постановка досліду та обладнання

Для проведення дослідження нами використовувався метод подвійного отримання ВАХ. При цьому використовувались дві ідентичні сонячні панелі. Одна панель була повністю чистою, а другу забруднювали пилом.

Для імітації умов освітлення використовувались галогенні лампи, що імітують сонячне освітлення. За основу конструкції проведення даного дослідження було обрано конструкцію лабораторної установки кафедри енергетика та електротехнічних систем (рис. 3.2). Але сонячні панелі було розміщено горизонтально.



Рисунок 3.2 – Лабораторна установка кафедри енергетики та електротехнічних систем Сумського НАУ

Лабораторна установка, що взята за основу проведення дослідження не дозволяла виконати рівномірне освітлення всієї площі сонячної панелі, і давала падіння променів світла під дуже гострим кутом до поверхні панелі. Цей недолік в установці для проведення дослідження було враховано і усунуто.

Також для проведення дослідження необхідно було дві повністю однакові сонячні панелі без терміну експлуатації. З них здійснювалась реєстрація показників ВАХ. Панелі були встановлені горизонтально, а над ними розміщено однакові світильники на однаковій висоті, що дозволяло імітувати однакові умови їх використання. Для проведення дослідження було обрано сонячні панелі з фотомодулями PS-P36. Характеристика даних модулів наведена в додатку дипломної роботи.

Для чистоти експерименту сонячні панелі було поміщено в темному приміщенні, де максимально можливо було відсутнє стороннє освітлення окрім галогенних ламп. Загальний вигляд особливостей проведення дослідження зображено на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд установки з особливостями проведення дослідження

При проведенні дослідження одна сонячна панель залишалась повністю чистою на іншу наносився шар пилу. Додатково вимірювалась інтенсивність ламп.

Температура поверхні сонячних панелей також постійно контролювалась протягом експерименту з використанням тепловізора. На тепловізорі контролювалась точка з максимальною температурою та вносились в данні експерименту.

Рівень освітлення регулювався в межах 200 до 800 Вт/м², для аналізу та полегшення регулювання було обрано крок 100 Вт/м². Регулювання рівня освітлення здійснювалось димером та виставлялось відповідно до кроку вимірювання та необхідного значення рівня освітлюваності.

3.3 Отримані результати вимірювань

Після проведення встановлення установки для дослідження було здійснено калібрування та налаштування основного обладнання та показників на необхідний однаковий рівень.

Також зазначимо, що галогенні лампи протягом проведення експерименту певним чином нагрівали поверхні сонячних панелей, а отже для регулювання температурних показників та повернення до початкових значень можна було виконати відключенням освітлювальних приладів. При цьому температура сонячних поверхонь протягом певного часу поверталась до рівня температури в приміщенні і експеримент можна було провести з початку.

Панель, що піддавалась забрудненню покривалась пилом фактично на 70%, що визначалось органолептичним методом. Отримані результати замірів наведено в таблицях та на графіках нижче.

Таблиця 3.1 – Залежність температури панелі від інтенсивності освітлення

Показник	Інтенсивність світла, Вт/м ²						
	200	300	400	500	600	700	800
Температура чистої панелі, °С	40,7	41,3	49,8	51,2	52,6	55,0	62,4
Температура забрудненої панелі, °С	42,3	42,6	51,0	52,3	54,9	56,4	64,7

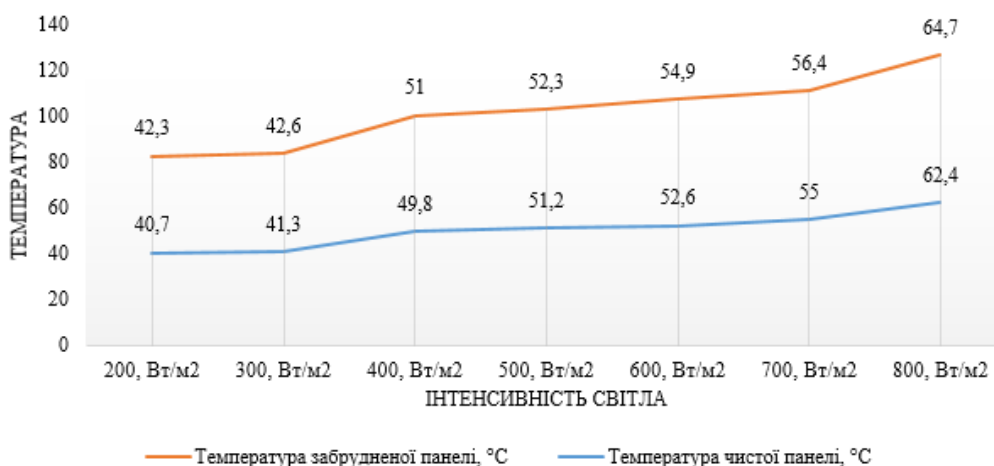


Рисунок 3.4. – Залежність температури від інтенсивності освітлення

Як видно з отриманих даних, температура чистої панелі та запиленої відрізняється фактично на 1...2°C. Необхідно зазначити, що робоча температура сонячних панелей має бути на рівні 25°C, а отже подібне підвищення температури сприяє також зменшенню ККД панелі. Це необхідно враховувати при проведенні подальших досліджень.

Таблиця 3.2 – Залежність потужності панелі від інтенсивності освітлення

Показник	Інтенсивність світла, Вт/м ²						
	200	300	400	500	600	700	800
Потужність чистої панелі, Вт	0,8	1,0	1,8	2,8	3,3	3,9	4,0
Потужність забрудненої панелі, Вт	0,6	0,6	1,1	1,7	2,0	2,3	2,5

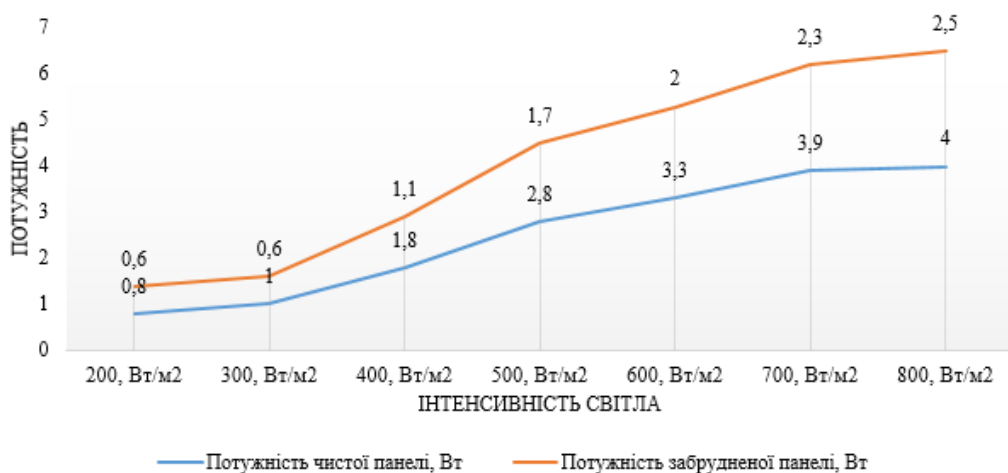


Рисунок 3.5 – Залежність потужності панелі від інтенсивності освітлення

В результаті розрахунків щільність пилу на сонячній панелі становила близько 1,4 г/м². З отриманих даних бачимо що запилення сприяє зменшенню продуктивності панелі приблизно на 5...6% від значення для чистої панелі.

Таблиця 3.3 – Залежність струму панелі від інтенсивності освітлення

Показник	Інтенсивність світла, Вт/м ²						
	200	300	400	500	600	700	800
Струм чистої панелі, А	0,8	1,0	1,8	2,8	3,3	3,9	4,0
Струм забрудненої панелі, А	0,6	0,6	1,1	1,7	2,0	2,3	2,5

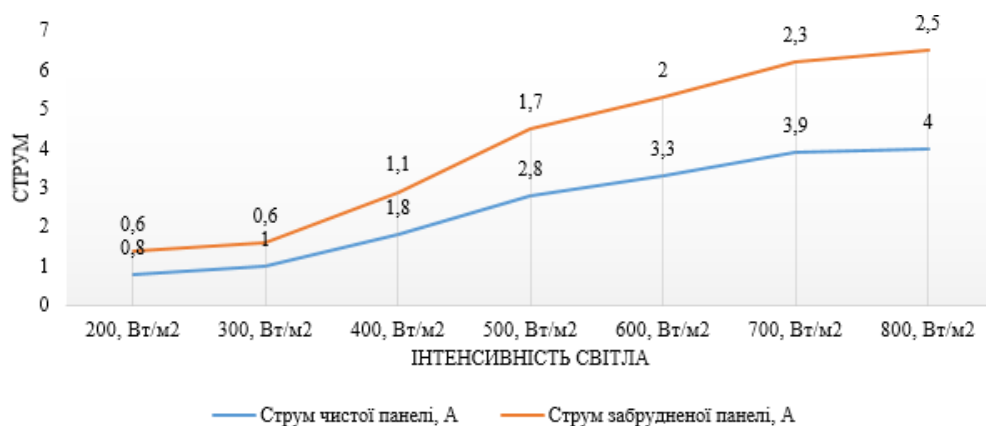


Рисунок 3.6 – Залежність струму панелі від інтенсивності освітлення

Схожу залежність між запиленою та чистою панеллю має і зміна струму. При цьому з ростом інтенсивності освітлення різниця струмів стає більшою. Також зазначимо, що чиста сонячна панель дає найбільший струм при різній інтенсивності освітлення.

Таблиця 3.4 – Залежність напруги панелі від інтенсивності освітлення

Показник	Інтенсивність світла, Вт/м ²						
	200	300	400	500	600	700	800
Напруга чистої панелі, В	17,7	17,9	18,3	18,6	18,6	18,6	18,4
Напруга забрудненої панелі, В	17,6	17,7	18,1	18,3	18,4	18,4	18,1

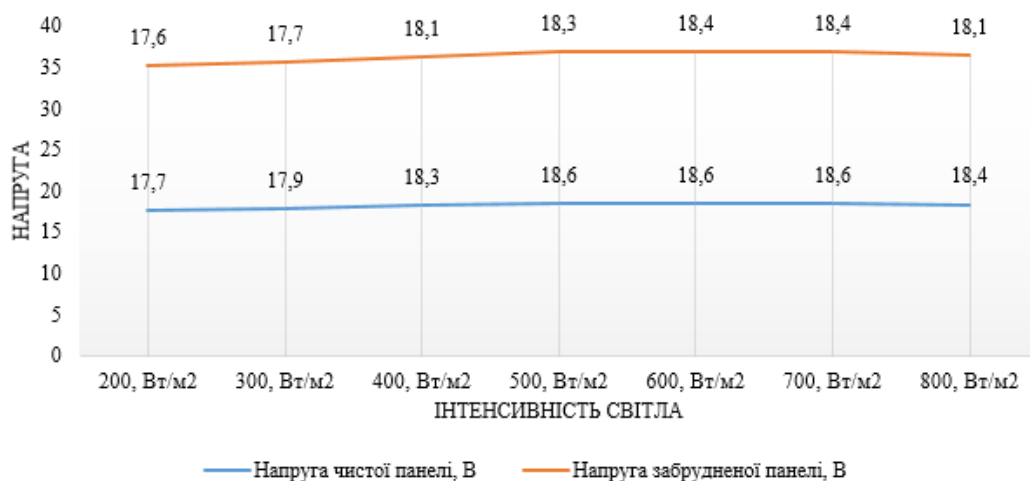


Рисунок 3.7 – Залежність напруги панелі від інтенсивності освітлення

Як видно з отриманих даних напруга сонячних панелей не має значної залежності від рівня освітленості. Також не має значного відхилення і рівень запилення сонячної панелі. При цьому запилення лиш незначно змінює значення напруги.

Висновок до розділу

З отриманих результатів проведення дослідження можна сказати, що найбільший вплив запилення чи забруднення сонячної панелі має на зміну величини температури, потужності та струму. Необхідно також враховувати особливість нагрівання сонячної панелі, що додатково призводить до зниження даних показників.

Для подальшої реалізації дослідження впливу забруднення чи запилення панелі можна сказати, що для проведення очистки сонячних електростанцій достатньо аналізувати два показники ВАХ – струм та потужність. Інші показники фактично не мають значного впливу на визначення необхідності проведення очищення сонячної електростанції. А отже для визначення необхідності проведення очищення сонячних панелей слід опиратись саме на ці дані.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Проведення досліджень пов'язаних з лабораторними установками, що працюють з електроенергією потребують особливої уваги з точки зору охорони праці та контролю працівників.

Основними небезпеками при роботі сонячних панелей є електричний струм, високий рівень магнітних випромінювання та інше. Зазначимо, що сонячні електростанції потребують проведення певного технічного обслуговування, в тому числі і періодичного миття.

Операції з технічного обслуговування сонячних панелей обов'язково проводяться фахівцями, що мають енергетичну освіту, розуміють будову сонячної електростанції та мають відповідні допуски до проведення робіт. До подібних операцій відносяться робота з різним електричним обладнанням, що працює під напругою.

Більша проблема виникає при необхідності проведення очищення сонячних панелей. Оскільки очищення проводиться з використанням великої кількості води та миючих засобів, то необхідно дотримуватись правил техніки безпеки.

Обов'язковою умовою є те, щоб очищення сонячних панелей проводилось відповідними фахівцями, адже більшість сонячних електростанцій в Сумській області розміщуються на дахах будинків або на значній висоті. Подібне розміщення потребує в першу чергу використання страхувального обладнання, засобів індивідуального захисту або використання різноманітних підйомників.

Перед початком проведення робіт з очищення сонячних панелей необхідно першочергово впевнитись у герметичності та цілісності всіх електричних частин сонячної електростанції. Після того, як працівник впевнився в безпечності проведення робіт здійснюється підготовка розчинів та підготовка необхідного обладнання.

При проведенні миття сонячних електростанцій обов'язковою умовою є відключення сонячної електростанції від електричної мережі, що дозволить

убезпечити всіх працівників. На вимикачі розміщують табличку «Не вмикати! Працюють люди», це дозволяє захистити працівників від можливого вмикання сонячної електростанції іншими працівниками чи сторонніми особами.

На майданчику розміщення сонячної електростанції заборонено знаходитися працівникам, що не приймають участь в очищенні панелей сонячної електростанції. Працівники, що виконують очистку панелей повинні бути повністю забезпечені засобами індивідуального захисту та робочим одягом.

Під час виконання робіт на конструкції сонячної електростанції необхідно пропрацювати місця куди заборонено ставати працівнику, щоб уникнути травмонебезпечних ситуацій. При цьому категорично заборонено ставати на самі сонячні панелі, що в першу чергу забезпечить їх від руйнування. По-друге волога та слизька поверхня сонячної панелі, що розміщена на висоті, може призвести до зісковзання робітника з висоти.

Сонячні електростанції великої потужності з великою кількістю панелей бажано очищати з використанням автоматизованих систем, з малою часткою залучення людей до роботи.

Іншою проблемою при проведенні очистки сонячних панелей, є період проведення робіт. Загалом сонячні панелі очищують в вечірній або в нічний час, а отже організація проведення робіт в даний час потребує значної організації.

В першу чергу необхідною умовою є забезпечення належного рівня освітлення місця робіт, а також забезпечення ліхтарями кожного працівника, що виконує роботи по очищенню.

Під час проведення очищення сонячної електростанції необхідно контролювати, щоб під нею не було інших працівників та рідина очищення не лилась з панелей на інших працівників чи задіяні транспортні засоби.

У випадку використання драбин необхідно забезпечити їх достатню довжину. Також необхідно розміщувати драбину на сухому та стійкому місці без блокування дверних проємів, проходів до систем керування сонячною електростанцією.

Одним з важливих аспектів при проведенні миття сонячних електростанцій є вибір необхідних матеріалів для проведення миття. Заборонено використовувати мийні засоби, що не підходять для проведення робіт чи навіть можуть привести до пошкодження матеріалів чи елементів конструкції.

Після виконання робіт з очистки сонячних панелей витримують паузу до просихання елементів сонячної електростанції, що дозволить унеможливити можливі короткі замикання. В основному сонячна електростанція просихає до ранку після виконання очистки. Вранці оператор здійснює включення сонячної електростанції в роботу та перевіряє її працездатність.

Висновки до розділу

Операції з очищення сонячних електростанцій від різного роду забруднень є основною операцією з їх обслуговування. При цьому даний процес потребує значних зусиль та уваги з точки зору дотримання вимог техніки безпеки та охорони праці. Дотримання всіх вимог з охорони праці, електробезпеки та правил технічної експлуатації дозволить зменшити рівень травмованості працівників та збільшить продуктивність їх роботи.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Дана дипломна робота присвячена визначенню впливу забруднення сонячної панелі на ефективність її роботи в умовах Сумської області. Виходячи з цього пропонується провести оцінку терміну окупності сонячних панелей, яким періодично проводиться очищення та відповідно для сонячних панелей, які протягом тривалого часу не очищуються. Виходячи з цього подібні сонячні панелі працюють не на повну потужність.

В Сумській області сонячні електростанції в основному є невеликої потужності та знаходяться в приватній власності, а отже врахуємо, що максимальна потужність подібної сонячної електростанції не більше 10 кВт.

Операції з обслуговування та миття сонячної панелі виконує власник без використання дорогої хімії, а лише з використанням ополіскування панелей водою. При цьому операції з очищення проводять максимум 3 рази в період з весни до осені. В інші періоди забезпечується самоочищення панелей за допомогою потоків вітру та опадів, в вигляді дощу.

Як зазначалось в попередньому розділі, нами отримано зменшення рівня ефективності від запиленості панелі на 5...6%, а отже врахуємо отримані данні при проведенні розрахунків економічної ефективності.

Для розрахунку економічного ефекту необхідно розуміти загальну вартість подібної сонячної електростанції. Станом на 01.09.2025 рік вартість всього обладнання та проведення робіт під ключ сонячної електростанції потужністю 10 кВт становить 968530 грн (інформація отримана від фірм, що займаються продажом, встановленням та налагодженням сонячних електростанцій).

Додатково врахуємо можливість продажу електричної енергії за зеленим тарифом в мережу. Середнє значення виробленої електроенергії сонячною електростанцією за рік для умов Сумської області становить 17500 кВт/рік. При цьому вартість електроенергії відповідно до зеленого тарифу становить 4,81 грн/кВт·год. Врахуємо особливість, що по зеленому тарифу продається

різниця між спожитою та виробленою електроенергією, а також врахуємо варіант коли вся отримана електроенергія йде на продаж до електричної мережі.

Виходячи з цього можна виконати розрахунки терміну окупності для сонячної електростанції з періодичним миттям панелей від забруднення:

$$T_o = \frac{K_{пр}}{(E_r - E_{п})C_{зт}} \quad (5.1)$$

де E_r – річна кількість згенерованої електроенергії сонячною електростанцією;

$E_{п}$ – річна кількість спожитої електроенергії споживачем;

$C_{зт}$ – вартість електроенергії за зеленим тарифом в Сумській області 4,81 грн/кВт·год.

Оскільки подібні сонячні електростанції в основному встановлюються на території приватних будинків, то середнє значення споживання електричної енергії ними за рік складає 4000 кВт·год/рік.

Відповідно до цього термін окупності для випадку постійного, періодичного очищення сонячних панелей для домогосподарства становить:

$$T_o^{чиста} = \frac{968530}{(17500 - 4000) \cdot 4,81} = 14,9 \text{ років}$$

Наступним показником є зменшення виробітку електроенергії сонячною електростанцією через запилення. В результаті кількість виробленої електроенергії за рік для таких умов становить 16450 кВт/рік. В кінцевому випадку термін окупності становитиме:

$$T_o^{запилена} = \frac{968530}{(16450 - 4000) \cdot 4,81} = 16,2 \text{ роки}$$

За умови, коли вся електрична енергія йде на продаж за зеленим тарифом отримаємо відповідні терміни окупності:

$$T_o^{\text{чиста}} = \frac{968530}{17500 \cdot 4,81} = 11,5 \text{ років}$$

$$T_o^{\text{запилена}} = \frac{968530}{16450 \cdot 4,81} = 12,2 \text{ роки}$$

Всі отримані дані зведемо до таблиці 5.1 для полегшення подальшого аналізу.

Таблиця 5.1 – Зведені дані економічної оцінки

Показник	Чисті панелі сонячної електростанції	Запилені панелі сонячної електростанції
Потужність сонячної електростанції, кВт	10	
Загальна вартість електростанції з монтажем та налагодженням, грн	968530	
Середня кількість електроенергії, що споживає приватне господарство на рік, кВт·год/рік	4000	
Середня кількість електроенергії, що виробляє сонячна електростанція за рік, кВт/рік	17500	1645
Термін окупності сонячної електростанції за умови часткового продажу виробленої електроенергії, років	14,9	16,2
Термін окупності сонячної електростанції за умови повного продажу виробленої електроенергії, років	11,5	12,2

Висновки до розділу

Виходячи з отриманих даних забрудненість сонячних панелей негативно впливає на економічні показники роботи сонячної електростанції та значно збільшує терміни її окупності. В приватних домогосподарствах Сумської області з врахуванням запиленості від різних джерел необхідною умовою є періодичне проведення очищення сонячних панелей.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Сонячні електростанції є найбільш розповсюдженими в Сумській області для домашнього та промислового використання. Найбільш популярними є монокристалічні та полікристалічні сонячні панелі, що мають різні розміри та потужність.

Загалом основною проблемою, що потребує вирішення є забруднення різного роду пилом, що виникає в результаті руху транспортних засобів, військових дій та інших особливостей регіону. Вирішення проблеми запиленості сонячних панелей в Сумській області частково вирішується очищенням їх дощами та потоками вітру.

Необхідно зазначити, що на ефективність роботи сонячних електростанцій впливає доволі велика кількість факторів, розглянутих в першому розділі. Зниження ефективності панелей в умовах сьогодення Сумської області фактично не досліджене, адже спостерігається зміна кліматичних умов та зростання запиленості різного походження.

2. Проведення аналізу рівня забрудненості сонячних панелей є складним процесом, що визначається різними методами. При цьому найбільшої ефективності набуває комбінація цих методів дослідження. Комбінації різноманітних методів в основному ґрунтуються на отриманні ВАХ сонячної панелі при різних умовах її використання. В результаті порівняння з чистою панеллю отримуємо величину рівня забруднення сонячної панелі.

Загальною складністю використання даного методу є формування доволі значної бази даних для проведення порівняльного аналізу. При цьому виникає необхідність застосування математичних моделей аналізу. Обрана математична модель для проведення опису рівня забруднення дозволяє провести аналіз зі значною точністю отриманих результатів.

3. З отриманих результатів проведення дослідження можна сказати, що найбільший вплив запилення чи забруднення сонячної панелі має на зміну величини температури, потужності та струму. Необхідно також враховувати

особливість нагрівання сонячної панелі, що додатково призводить до зниження даних показників.

Для подальшої реалізації дослідження впливу забруднення чи запилення панелі можна сказати, що для проведення очистки сонячних електростанцій достатньо аналізувати два показники ВАХ – струм та потужність. Інші показники фактично не мають значного впливу на визначення необхідності проведення очищення сонячної електростанції. А отже для визначення необхідності проведення очищення сонячних панелей слід опиратись саме на ці дані.

4. Операції з очищення сонячних електростанцій від різного роду забруднень є основною операцією з їх обслуговування. При цьому даний процес потребує значних зусиль та уваги з точки зору дотримання вимог техніки безпеки та охорони праці. Дотримання всіх вимог з охорони праці, електробезпеки та правил технічної експлуатації дозволить зменшити рівень травмованості працівників та збільшити продуктивність їх роботи.

5. Виходячи з отриманих даних забрудненість сонячних панелей негативно впливає на економічні показники роботи сонячної електростанції та значно збільшує терміни її окупності. В приватних домогосподарствах Сумської області з врахуванням запиленості від різних джерел необхідною умовою є періодичне проведення очищення сонячних панелей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. N. Shakhovska, M. Medykovskyy, R. Melnyk та N. Kryvinska, «Optimization of the Active Composition of the Wind Farm Using Genetic Algorithms,» Tech Science Press (TSP), т. 69, № 3, pp. 3065-3078, 2021.
2. M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Modeling of the energy-dynamic modes of the wind farm with the battery energy storage system (BESS),» Journal of Computational Problems of Electrical Engineering, т. 11, № 1, 2021.
3. М. Медиковський, Р. Мельник та М. Дубчак, «Нейромережевий метод визначення активного складу вітрової електричної станції,» Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Інформаційні системи та мережі», т. 8, р. 55 – 64, 2020.
4. M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Processing of data on the intensity of solar radiation for solar power plant management systems,» Econtechmod. An international quarterly journal, т. 7, № 3, pp. 33 - 38, 2019.
5. V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk та M. Dilai, «Optimization of wind farm structure control,» Advances in Intelligent Systems and Computing CSIT, т. 689, pp. 320-333, 2018.
6. V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Modification of Dynamic Programming Method in Determining Active Composition of Wind Power Stations,» Computational problems of electrical engineering, № Vol. 6, pp. 83-90, 2019.
7. Р. Мельник, «Аналіз алгоритмів оцінювання ефективності сонячних електростанцій,» в 10 Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні», м. Львів, Україна, 2019.
8. Г. Шмідт, А. Конеченков, М. Ільчук та М. Гріцишина, «Вітроенергетичний сектор України 2018. Огляд ринку,» Українська вітроенергетична асоціація, 2019.

9. С. Кудря, Л. Яценко та Г. Душина, Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України, Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2018.
10. О. Кармазін, Балансова надійність електроенергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики. Автореферат, Київ: Національної академії наук України, 2019.
11. В. Павловський, Л. Лук'яненко, І. Гончаренко та А. Захаров, «Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умови приєднання до електричної мережі,» Праці ІЕД НАНУ, № 43, pp. 18-23, 2016.
12. П. Лежнюк, В. Комар та С. Кравчук, Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: монографія, Вінниця: ВНТУ, 2018.
13. І. Щур та В. Климко, «Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта. Електромеханічні і енергозберігаючі системи,» Електромеханічні і енергозберігаючі системи, № 2, pp. 92-100, 2018.
14. М. Кузнєцов, О. Лисенко та О. Мельник, «Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ,» Відновлювана енергетика, № 2, pp. 6-15, 2018.
15. М. Кузнєцов та О. Лисенко, «Оцінка балансу потужності комбінованих енергосистем,» Відновлювана енергетика, № 4, pp. 6-14, 2018.
16. М. Стаднік, Д. Проценко та С. Бабій, «Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії,» Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 4, pp. 32-41, 2020.
17. О. Болдирєв, А. Квицинський, М. Редін, М. Клопот та М. Головатюк, «Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України,» 2019. [Онлайновий]. Available: https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/06/SOU-NEK-341.001_2019.pdf. [Дата звернення: 06.06.2021].

18. М. Кулик та О. Згуровець, «Можливості використання великих накопичувачів електроенергії для стабілізації частоти в об'єднаних енергосистемах з потужними сонячними електростанціями,» Відновлювана енергетика, № 3, р. 6–14, 2018.
19. А. Барило, М. Бенменні, В. Бурко, М. Бурко та П. Васько, Відроджувальні джерела енергії. Монографія, Київ, 2020.
20. В. Кравчишин, Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії, Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019.
21. О. Ємець та Л. Колечкіна, Ємець О.О. Задачі комбінаторної оптимізації з дробово-лінійними цільовими функціями: Монографія, Київ: Наук. думка., 2005.
22. М. Медиковский та О. Шуневич, «Виконання цілочисельного програмування для визначення складу вітрової електростанції,» Збірник 164 наукових праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, т. 57, рр. 230-233, 2017.
23. О. Шуневич, Інформаційна технологія формування динамічного складу вітрової електростанції, Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019.
24. М. О. Medykovskyy, V. M. Teslyuk та О. В. Shunevych, «Optimization of wind power stations structure by the dynamic programming method,» Актуальні проблеми економіки, № 2, рр. 508-515, 2018.
25. А. Кожухівський та О. Намофілова, «Застосування генетичних алгоритмів у задачі про укладання ранця,» АСУ и приборы автоматики, № 173, рр. 43-47, 2015. 165
26. М. Кузнецов та О. Лисенко, «Можливості короткотермінового прогнозування сонячної енергії,» Відновлювана енергетика, № 1, рр. 25- 32, 2017.
27. М. Бик, С. Фроленкова, О. Букет та Г. Васильєв, «Технічна електрохімія. Частина 2. Хімічні джерела струму,» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2018.

ДОДАТКИ

Додаток А

Особливості виробітку електричної енергії СЕС



Рисунок А1 – Порівняльна оцінка сумарного значення сонячної інсоляції по регіонах України (кВт·год/м²·день)

Таблиця А1 – Середньодобові значення сонячної енергії в Сумській області

Параметр	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Сонячна енергія, кВт	1,0	1,8	3,2	4,5	5,9	6,4	6,3	5,5	3,9	2,3	1,1	0,8

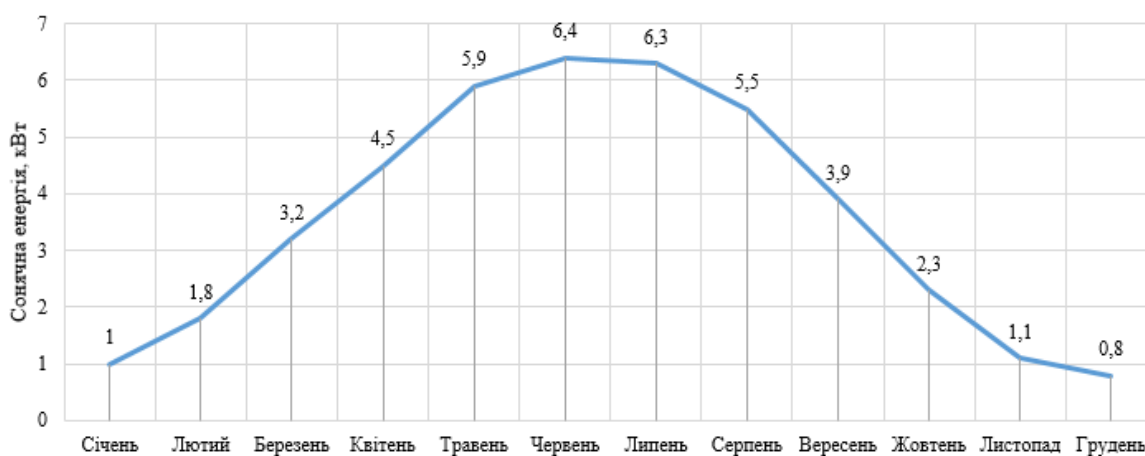


Рисунок А2 – Графік середньодобових значень сонячної енергії в Сумській області

Таблиця А2 – Середні значення хмарності

Параметр	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Хмарно, %	74	74	65	55	46	42	34	34	46	55	69	74
Ясно, %	26	26	35	45	54	58	66	66	54	45	31	26

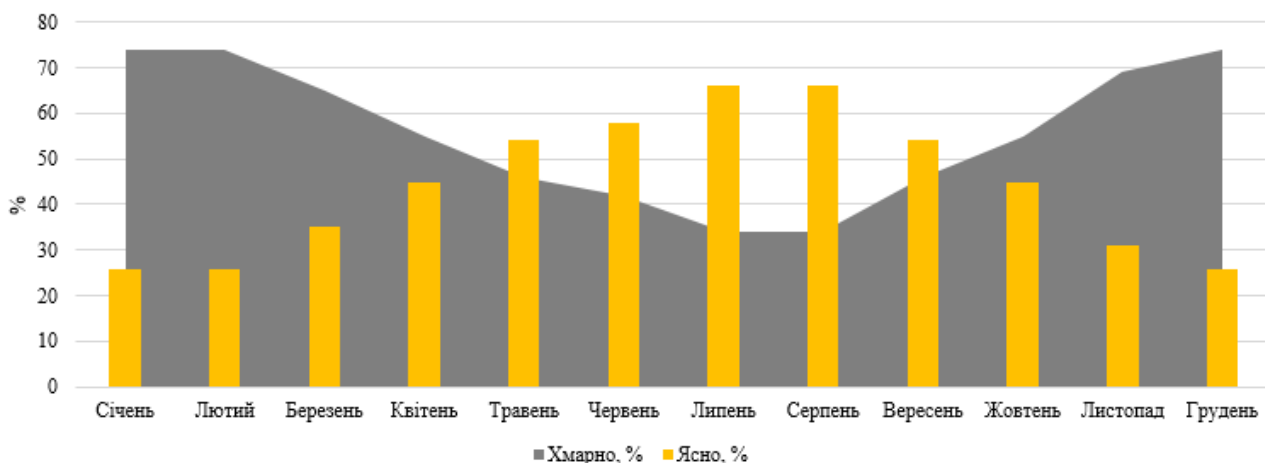


Рисунок А3 – Графік хмарності Сумської області

Найменшу кількість виробленої електроенергії від сонячних електростанцій в Сумській області, отримують в зимові місяці, оскільки кількість сонячної енергії взимку є найменшою. Відповідно в зимові місяці відсоток хмарності є найбільший.

Таблиця А3 – Середні значення денного світла протягом доби по місяцях

Параметр	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Денне світло, год	8,5	10,1	12,0	13,9	15,6	16,5	16,0	14,4	12,5	10,6	8,9	8,0

Таблиця А4 – Середнє значення швидкості вітрів

Параметр	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Швидкість вітру, км/год	18,6	18,9	18,0	15,8	14,2	13,6	13,0	13,4	14,7	15,8	16,7	17,7

Таблиця А5 – Середня кількість дощових та снігових опадів

Параметр	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Дощові опади, мм	11,8	12,1	18,6	30,8	38,8	53,3	52,9	39,2	38,9	37,1	24,7	15,3
Снігові опади, мм	131,0	100,5	69,1	17,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	9,8	69,6	112,0

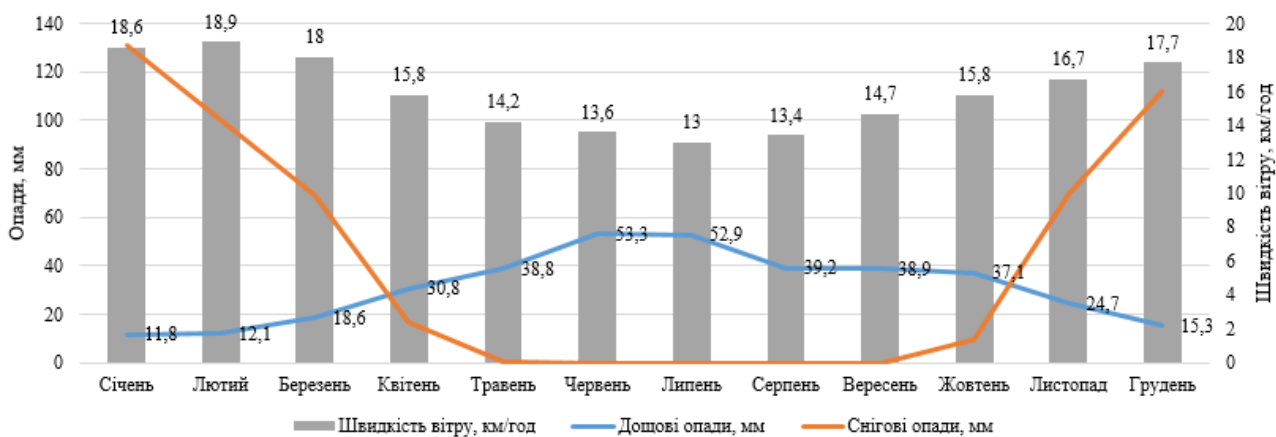


Рисунок А4 – Графік щомісячних опадів та швидкості вітру

З графіку видно, що можливість забруднення сонячних електростанцій є найбільшим в зимові місяці. При цьому швидкість вітрів в регіоні, що сприяють очищенню сонячних панелей є достатньою для здування основних забруднень.

В літні місяці спостерігається додатково збільшення опадів в вигляді дощу, що сприяють змиванню пилу з панелей. Дощі в зимову пору року можливі і сприяють фактично в більшості своїй утворенню льодяної кірки на панелях сонячної електростанції.

Таблиця А6 – Абсолютний максимум температури повітря

Параметр	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Абсолютний максимум температури повітря, °С	11,0	13,5	21,0	30,0	33,6	36,1	38,0	39,4	31,1	27,9	22,8	11,5

Враховуючи особливості нормальних температур експлуатації (25°С) слід зауважити, що в літні місяці можливий зниження ефективності роботи сонячних панелей на температурний коефіцієнт.

Таблиця А7 – Врахування температурного коефіцієнту при визначенні ефективності сонячних панелей

Параметр	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Ефективність роботи СЕС з врахуванням температурного коефіцієнту	1,0	1,0	1,0	0,975	0,957	0,945	0,935	0,928	0,969	0,986	1,0	1,0

Додаток Б

**Характеристика сонячних панелей обраних для проведення
дослідження**

Таблиця Б1 – Електричні характеристики сонячних модулів PS-P36 150 Вт

№ з/п	Показник	Значення
1	Максимальна потужність P_{max} , Вт	37,0
2	Напруга при V_{mm} , В	18,41
3	Напруга холостого ходу V_{oc} , В	22,06
4	Струм при I_{mm} , А	2,15
5	Струм короткого замикання I_{sc} , А	2,63
6	Температурний коефіцієнт $I_{sc}(KI)$, А/°С	0,058
7	Кількість комірок в серії N , шт	36