

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Вплив забруднення поверхні фотоелектричних панелей на їх ефективність**

Виконав студент VI курсу, групи ЕТм-61  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Коваль А.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Коваль В.П.  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Мовчан Л.Т.  
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Тарасенко М.Г.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Тарасенко М.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
« » 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Ковалю Андрію Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вплив забруднення поверхні фотоелектричних панелей на їх ефективність

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» листопада 2023 року № 4/7-1040.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 25.12.2023

3. Вихідні дані до роботи Фотоелектричні панелі працюють на території України. Розташовані в напрямку півдня під всесезонним кутом. Дослідити вплив на їх ефективність пилу, який потрапляє на їх поверхню. Інші випадкові забруднення не враховувати.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Вплив пилу на продуктивність фотоелектричних елементів

2. Методика проведення експериментів

3. Експериментальна установка

4. Зміна вихідної потужності та опромінення з часом

5. Зміна продуктивності фотоелектричних панелей з часом

6. Підсумки для всіх тестів

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Забрудненість сонячних панелей пилом

2. Алгоритм проведення досліджень

3. Вигляд системи сонячних фотоелектричних панелей

4. Блок-схема сонячної фотоелектричної системи

5. Зміна вихідної потужності та опромінення з часом

6. Зміна продуктивності з часом

7. Розподіл пилу з часом

8. Опромінення чистих і запилених панелей

9. Вихідна потужність для чистих і запилених панелей

10. Зменшення продуктивності зі збільшенням маси пилу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Клепчик В.М., ст. викладач кафедри ХО</i>		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 10.11.2023 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 10.11.2023 по 14.11.2023	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 15.11.2023 по 10.12.2023	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	з 11.12.2023 по 13.12.2023	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 13.12.2023 по 14.12.2023	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 15.12.2023 по 17.12.2023	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 18.12.2023 по 20.12.2023	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 21.12.2023 по 25.12.2023	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Коваль А.В.  
\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Коваль В.П.  
\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 64 сторінок, 18 аркушів презентації, 34 ілюстрації та 15 використаних першоджерел.

**Об'єкт дослідження** – процес забруднення сітлопоглинаючої поверхні фотоелектричних панелей та вплив його на їх продуктивність.

**Предмет дослідження** – фотоелектричні панелі у сонячній електростанції.

**Метою кваліфікаційної роботи є:** дослідити швидкість накопичення пилуки на поверхні фотоелектричних панелей та вплив його на їх продуктивність.

У роботі проведено аналіз принципу роботи та ефективності фотоелектричних елементів та вплив пилу на їх продуктивність, на основі аналізу досліджень, представлених у літературі. Описано методику проведення експериментів з дослідження впливу пилу на ефективність фотоелектричних панелей. Сформульовано алгоритм роботи. Розроблено блок-схему підключення сонячних фотоелектричних панелей та скляних панелей до комп'ютера для збору та реєстрації даних. Представлені результати дослідження зміни продуктивності сонячних фотоелектричних панелей в залежності від часу експлуатації та забрудненості поверхні. Показано результати в послідовності, починаючи з погодинного і закінчуючи безперервним 3-місячним тестом. Проведено аналіз отриманих результатів і виконано прогноз падіння продуктивності виробництва електроенергії на рік

*Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРОДУКТИВНІСТЬ, ЗАБРУДНЕННЯ ПИЛОМ, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ*

## ЗМІСТ

### ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	
1.1 Історія фотоелектричних систем .....	10
1.2 Основний принцип роботи фотоелектричних систем .....	11
1.3 Ефективність сонячних елементів .....	12
1.4 Вплив пилу на продуктивність фотоелектричних елементів .....	13
1.5 Накопичення пилу на поверхні сонячних фотоелектричних панелей .....	14
1.6 Висновки до розділу .....	17
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ .....	
2.1 Методика проведення експериментів .....	18
2.2 Експериментальна установка .....	19
2.3 Прилад для вимірювання випромінювання .....	21
2.4 Блок-схема системи реєстрації характеристик сонячних фотоелектричних панелей та випромінювання .....	22
2.5 Висновки до розділу .....	23
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ .....	25
3.1 Погодинне дослідження фотоелектричних панелей .....	25
3.1.1 Зміна вихідної потужності та опромінення з часом при погодинному тестуванні .....	25
3.1.2 Зміна продуктивності фотоелектричних панелей з часом при погодинному тестуванні .....	26
3.1.3 Розподіл маси пилу з часом при погодинному тестуванні .....	27
3.1.4 Підсумки погодинних випробувань на опромінення .....	28
3.1.5 Підсумок погодинних тестів на вихідну потужність .....	29
3.1.6 Падіння продуктивності сонячних фотоелектричних панелей при погодинному тестуванні .....	31

3.2 Щоденне (добове) дослідження фотоелектричних панелей .....	32
3.2.1 Зміна вихідної потужності та випромінювання з часом при щоденному тестуванні.....	32
3.2.2 Зміна падіння продуктивності з часом при щоденному тестуванні .....	33
3.2.3 Підсумок щоденних тестів на випромінювання .....	34
3.2.4 Підсумок щоденних тестів на вихідну потужність .....	35
3.2.5 Падіння продуктивності сонячних фотоелектричних панелей при щоденному тестуванні .....	36
3.3 Тижневе випробування.....	38
3.3.1 Зміна вихідної потужності та опромінення з часом під час тижневого випробування .....	38
3.3.2 Зміна падіння продуктивності з часом під час щотижневого тесту.....	39
3.3.3 Підсумки щотижневих тестів на опромінення.....	40
3.3.4 Підсумки щотижневих тестів вихідної потужності .....	41
3.3.5 Падіння продуктивності сонячних фотоелектричних панелей при щотижневому тестуванні.....	42
3.4 Місячне випробування.....	43
3.4.1 Зміна вихідної потужності та опромінення з часом під час місячного випробування .....	43
3.4.2 Зміна падіння продуктивності з часом при щомісячному тестуванні.....	44
3.4.3 Підсумки щомісячних тестів на опромінення.....	45
3.4.4 Підсумки щомісячних тестів вихідної потужності .....	46
3.4.5 Падіння продуктивності сонячних фотоелектричних панелей під час щомісячного тестування .....	47
3.5 Безперервне 3-місячне випробування.....	49
3.5.1 Зміна вихідної потужності та опромінення з часом під час 3-місячного випробування .....	49

3.5.2 Зміна падіння продуктивності з часом при щомісячному тестуванні.....	50
3.6 Підсумки для всіх тестів.....	51
3.6.1 Падіння продуктивності вихідної потужності .....	51
3.6.2 Середня маса накопичення пилу .....	52
3.7 Прогнозоване падіння продуктивності через рік.....	53
3.8 Висновки до розділу .....	54
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	
4.1 Причини електротравм, напруга кроку.....	55
4.2 Фізичні основи електробезпеки.....	56
4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час .....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Виробництво електроенергії в усьому світі в основному здійснюється за рахунок використання невідновлюваних джерел енергії, особливо викопного палива. Однак ці ресурси будуть значною мірою вичерпані в певний час у майбутньому. Така ситуація змушує нас шукати відновлювані джерела енергії. Сонячна енергія є одним з основних перспективних джерел чистої енергії в майбутньому, оскільки вона має багато переваг. Серед переваг сонячної енергії є те, що вона є довготривалою, може бути використана майже будь-де та забезпечує економічно ефективне вирішення енергетичних проблем. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, світове споживання енергії збільшиться на 53% у 2030 році, причому 70% зростання попиту припаде на країни, що розвиваються.

З іншого боку, зниження продуктивності сонячних фотоелектричних систем через накопичення пилу, як правило, перешкоджає їх використанню в якості альтернативної енергії. Деградація системи сонячних фотоелектричних панелей зазвичай відбувається через накопичення пилу на сонячних фотоелектричних панелях, що знижує практичну ефективність системи. Більше того, відкладення пилу, пташиного посліду та сольових плям у воді може значно погіршити ефективність сонячних фотоелектричних панелей. Як правило, сонячна фотоелектрична система прослужить лише близько 25 років через тріщини у склі, розбите скло та корозію міжелементних доріжок. Належне встановлення системи сонячних панелей, наприклад, орієнтація, експозиція, сонячні треки, є дуже важливим для максимізації поглинання сонячного випромінювання, що може забезпечити безперервне виробництво електроенергії на постійній основі.

Сучасні дослідження, спрямовані на визначення характеристик осадження дрібних частинок та їх впливу на продуктивність фотоелектричних систем, є складним явищем і залежать від різноманітних екологічних і погодних умов в



атмосфері з різних джерел, таких як дрібний пил, що піднімається вітром, пішоходами, транспортними засобами та забрудненням навколишнього середовища. Осідання пилу в основному залежить від властивостей пилу, тобто хімічних властивостей, розміру, форми і ваги, а також від умов навколишнього середовища, тобто факторів, характерних для конкретного місця, особливостей навколишнього середовища і погодних умов. Якість поверхні сонячної панелі, кут нахилу, вологість і швидкість вітру також впливають на накопичення пилу на поверхні.

Сонячна енергія для виробництва електроенергії за допомогою фотоелектричних панелей є вигідною, оскільки вона не забруднює навколишнє середовище, є екологічно чистою і не вимагає значних витрат на обслуговування. Однак, накопичення пилу на сонячних фотоелектричних панелях з природних причин може знизити продуктивність сонячної фотоелектричної системи. Дослідження, проведені в різних країнах, показали, що накопичений пил на фотоелектричних панелях може знизити продуктивність сонячної електростанції. Однак не було проведено жодного дослідження щодо тенденції накопичення пилу та частоти очищення сонячних панелей від пилу в Україні. Для визначення зниження продуктивності сонячних фотоелектричних панелей через природні причини осідання пилу на сонячних фотоелектричних панелях необхідно провести дослідження накопичення пилу в Україні.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної роботи є: дослідити швидкість накопичення пилуки на поверхні фотоелектричних панелей та вплив його на їх продуктивність.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати вплив забруднення на ефективність фотоелектричних панелей, спираючись на існуючі дослідження.
2. Вивчити тенденцію накопичення пилу протягом різних періодів часу та його очищення на сонячній фотоелектричній системі.

3. Дослідити вплив накопичення пилу на продуктивність сонячних фотоелектричних панелей.
4. Спрогнозувати тенденцію накопичення пилу з часом.
5. Запропонувати періодичність очищення поверхні фотоелектричних панелей для електростанцій.

**Об'єкт дослідження** – процес забруднення світлопоглинаючої поверхні фотоелектричних панелей та вплив цього на їх продуктивність.

**Предмет дослідження** – фотоелектричні панелі у сонячній електростанції.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

В результаті експериментальних досліджень отримано динаміку запилення поверхні фотоелектричних панелей.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Отримані дані, щодо забруднення світлопоглинаючої поверхні фотоелектричних панелей дозволили спрогнозувати зменшення електрогенерації впродовж року і сформулювати рекомендації щодо інтервалів її очищення.

**Апробація.** Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на X Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2023 року. ТНТУ [1]

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (15 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 65 сторінок, 34 рисунки.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Історія фотоелектричних систем

Фізичне явище, відповідальне за перетворення світла в електроенергію, яке викликає фотоелектричний ефект, вперше спостерігав у 1839 році французький фізик Едмунд Беккерель. Беккерель помітив появу напруги при освітленні одного з двох однакових електродів у слабопровідному розчині. У 1870-х роках фотоелектричний ефект був вперше досліджений у твердих тілах, таких як селен. У 1880-х роках були створені селенові фотоелектричні елементи, які демонстрували 1%-2% ефективності перетворення світла в електроенергію. Селен перетворює світло у видимій частині сонячного спектру, тому його швидко використовували у фотографії, яка тоді тільки зароджувалася, для фотометричних пристроїв.

Навіть сьогодні світлочутливі елементи в фотоапаратах для регулювання витримки затвора відповідно до освітлення виготовляються з селену. Однак селенові елементи так і не стали практичними в якості перетворювачів енергії, оскільки їхня вартість занадто висока порівняно з крихітною кількістю енергії, яку вони виробляють при 1% ефективності. Тим часом робота над фізикою фотоелектричних явищ розширилася. Значний крок вперед у технології сонячних елементів був зроблений у 1940-х і на початку 1950-х років, коли був розроблений метод, який отримав назву "метод Чохральського", для виробництва високочистого кристалічного кремнію.

У 1954 році робота в Bell Telephone Laboratories завершилася створенням кремнієвого фотоелектричного елемента з ефективністю 4 %. Незабаром Bell Labs покращила цей показник до 6 %, а потім і до 11 %, що ознаменувало абсолютно нову еру комірок, які виробляють енергію. У 1950-х роках було випробувано кілька схем комерційного використання кремнієвих фотоелементів. Більшість з них призначалися для використання в регіонах, географічно ізольованих від електромереж. Але несподіваний бум

фотоелектричних технологій прийшов з іншого боку. У 1958 році американський космічний супутник "Авангард" використовував невеликий (менше одного вата) масив фотоелементів для живлення свого радіоприймача. Елементи працювали настільки добре, що космічні вчені незабаром зрозуміли, що фотоелектричні перетворювачі можуть бути ефективним джерелом енергії для багатьох космічних місій. Відтоді розробка технології сонячних елементів стала частиною космічної програми.

## **1.2 Основний принцип роботи фотоелектричних систем**

Сонячні панелі використовують енергію сонячного світла і перетворюють її в корисну електроенергію. Фотони є основною фундаментальною одиницею будь-якої форми світлової енергії. Фотони, які випромінює сонце, вловлюються сонячними панелями. Генерація електроенергії в сонячних панелях можлива завдяки принципу, який називається фотоелектричним ефектом [2]. Фотоелектричний ефект - це створення електричної напруги або електричного струму, що протікає по замкнутому контуру в сонячній панелі. Електрони, які генеруються, коли сонячні панелі піддаються впливу потоку фотонів, переносяться між різними енергетичними діапазонами всередині атома, з яким вони зв'язані. Це перенесення електронів змушує їх накопичуватися, щоб викликати накопичення напруги між двома електродами. Фотоелектричні системи поведуться в надзвичайний і корисний спосіб. Вони реагують на світло, перетворюючи частину його в електроенергію. Крім того, це перетворення є новим і унікальним, оскільки фотоелектрична система не має рухомих частин, які зношуються, і не містить рідини або газів, які можуть витікати, як у деяких сонячно-теплових системах. Більше того, система не забруднює навколишнє середовище під час виробництва електроенергії і не споживає палива для роботи, оскільки є "зеленою" енергією.

### **1.3 Ефективність сонячних елементів**

Ефективність сонячної енергії - це кількість світла, яка може бути перетворена в корисну електроенергію. Ефективність сонячної фотоелектричної панелі - це кількість світла, яку весь модуль перетворює в електроенергію [2,3,4,5]. Ефективність сонячної фотоелектричної панелі є нижчою через відстань між елементами, а скло, що покриває панель, відбиває частину сонячного світла. Отже, важливо звертати увагу на ефективність сонячних панелей, оскільки це вказує на те, скільки електроенергії насправді буде виробляти сонячна енергетична система.

### **1.4 Вплив пилу на продуктивність фотоелектричних елементів**

Пил складається з частинок в атмосфері, які надходять з різних джерел, таких як ґрунт, пил, піднятий погодою, виверженням вулканів і забрудненням. За даними Коса у 2002 році, пил містить невелику кількість пилку рослин, людського та тваринного волосся, текстильних волокон, паперових волокон, мінералів з відкритого ґрунту та клітин людської шкіри в будинках або в інших місцях, де перебуває людина. В різних країнах проводились різні дослідження впливу пилу на сонячні елементи. У США повідомлялося, що погіршення продуктивності колекторів становило близько 4,7%, що було пов'язано з осадженням пилу. Крім того, повідомлялося, що в Саудівській Аравії протягом шестимісячного періоду спостерігалось зниження продуктивності на 40%, а протягом восьмимісячного періоду - на 32%. Крім того, в Кувейті повідомлялося про зниження продуктивності сонячних панелей на 17% - 65% через зміну кута нахилу сонячного колектора [6]. В іншому дослідженні, проведеному в Єгипті, повідомлялося про зниження продуктивності на 33,5%-65,8% при тривалості впливу від одного до шести місяців. У тропічній країні, Таїланді, повідомлялося про зниження на 11% протягом одного місяця.

Загалом, всі дослідники зосереджувалися на тривалості деградації сонячних панелей, а не на кількісній оцінці накопичення пилу на сонячних панелях.

Ефект розміру пилу також має значний вплив на продуктивність системи сонячних фотоелектричних панелей. Сучасні дослідники провели експеримент щодо впливу розміру пилу на продуктивність сонячних фотоелектричних панелей. Експеримент був повністю змодельований за допомогою штучного пилу, який представляв собою вапняк, цемент і частинки вуглецю при постійному освітленні галогенними лампами. Було виявлено, що дрібні частинки вуглецю діаметром 5 мкм мають найбільший негативний вплив на ефективність фотоелектричних панелей. Дослідження також показало, що вплив дрібніших частинок має більший вплив, ніж грубіших, на ефективність фотоелектричних перетворювачів для одного і того ж типу пилу. Використовувалися два штучних пилу різного розміру - грязь і тальк. Результат показав, що тальк має меншу вихідну потужність порівняно з грязьовим пилом. Загалом, обидва дослідники показали однаковий результат щодо впливу розміру пилу на продуктивність фотоелектричних панелей.

Казем та ін. [7] провели дослідження впливу фотоелектричних панелей на роботу в приміщенні. Продуктивність фотоелектричних модулів тестувалася при осадженні різних забруднювачів, таких як червоний ґрунт, зола, пісок, карбонат кальцію та кремнезем. Експеримент показав, що на падіння напруги та вихідної потужності фотомодуля впливають маса накопиченого забруднювача та тип забруднювача. В іншому дослідженні [8], присвяченому фізичним властивостям і щільності осадження пилу на сонячних фотоелектричних панелях, використовувався штучний пил, до складу якого входили вапняк, цемент і частинки вуглецю. Повідомлялося, що частинки цементу при щільності  $73 \text{ г/м}^2$  призводять до найбільш значного падіння напруги короткого замикання фотоелектричних панелей на 80 %.

Природний пил є одним з найпоширеніших в атмосфері. Автори роботи [7] провели експеримент в пустелі Оману щодо впливу природного пилу на продуктивність сонячних фотоелектричних панелей. Результати показали, що

фотоелектричні модулі генерували найбільшу потужність, коли було чисто і прохолодно. У той час як зниження вихідної потужності відбувається, коли панель була сухою і чистою, і страждає від більшого зниження вихідної потужності. З іншого боку, інший автор [9] також провів такий самий експеримент на природному пилу в Бангладеш. Отримані результати показали, що вихідна потужність для чистої панелі була більшою, ніж вихідна потужність для запиленої панелі.

### **1.5 Накопичення пилу на поверхні сонячних фотоелектричних панелей**

Існує багато факторів, які впливають на осідання пилу на сонячній фотоелектричній панелі, а саме: тип, розмір, форма і вага пилу. Кут нахилу сонячної фотоелектричної панелі також впливає на накопичення пилу на поверхні сонячної фотоелектричної панелі. Хоттель і Вурц були одними з піонерів, які досліджували вплив пилу на сонячні системи. У 1940 році вони провели експеримент по вивченню продуктивності сонячних колекторів тривалістю 3 місяці. З отриманих результатів було виявлено, що 1% погіршення продуктивності сонячного фотоелектричного колектора було викликано пилом, що накопичувався на скляній пластині, нахиленій під кутом  $30^\circ$  від горизонталі в промисловій зоні Сполучених Штатів Америки. В іншому дослідженні Гарг вивчав вплив бруду на сонячне пропускання, порівнюючи скляні пластини і пластикові плівки в Руркі, Індія. Дослідження показало, що на горизонтальне скло потрапило більше бруду, ніж на вертикальне. Крім того, ще одне дослідження, проведене Сайігом та ін. в 1985р щодо впливу накопичення пилу на нахилених скляних пластинах, розташованих у Кувейті, виявило зниження коефіцієнта пропускання скла на величину від 64 % до 17 % для кутів нахилу від  $0^\circ$  до  $60^\circ$ , відповідно, після 38 днів експозиції. Крім того, зменшення на 30 % корисного приросту енергії спостерігалось в горизонтальному колекторі після трьох днів накопичення пилу. Знову ж таки, аналогічне дослідження,

проведене Нахаром і Гуптою в 1990р щодо продуктивності сонячних фотоелектричних панелей в залежності від кута нахилу, показало, що осадження пилу зменшується зі збільшенням нахилу від горизонталі. Зменшення коефіцієнта пропускання для скла склало 19,17%, 13,81% і 5,67% для кутів нахилу  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  і  $90^\circ$ .



Рисунок 1.1 – Забрудненість сонячних панелей пилом

Хеберлін і Граф у 1998р вивчали накопичення забруднення залізним пилом та іншими компонентами на краях рамкових модулів сонячних елементів у Бургдорфі. Накопичення пилу знижує продуктивність вихідної потужності сонячної панелі до 8-10%. Коли було проаналізовано матеріал пилу, було зроблено висновок, що пил в умовах Бургдорфа складається з оксиду заліза, кремнію та деяких органічних матеріалів. Мазумдер та ін. у 2002 р вивчали механізми осадження пилу на сонячному модулі, і дійшли висновку, що зниження продуктивності сонячних модулів залежить від розміру частинок, форми, розподілу, механізмів осадження та орієнтації пилових відкладень на модулі. В іншому дослідженні розглядалися три основні категорії: адгезія пилу, поверхневі електричні поля і перенесення пилу. Було зроблено висновок, що



механічна адгезія зумовлена колючою формою пилинок, а пил прилипає до скафандрів як механічно, так і електростатично.

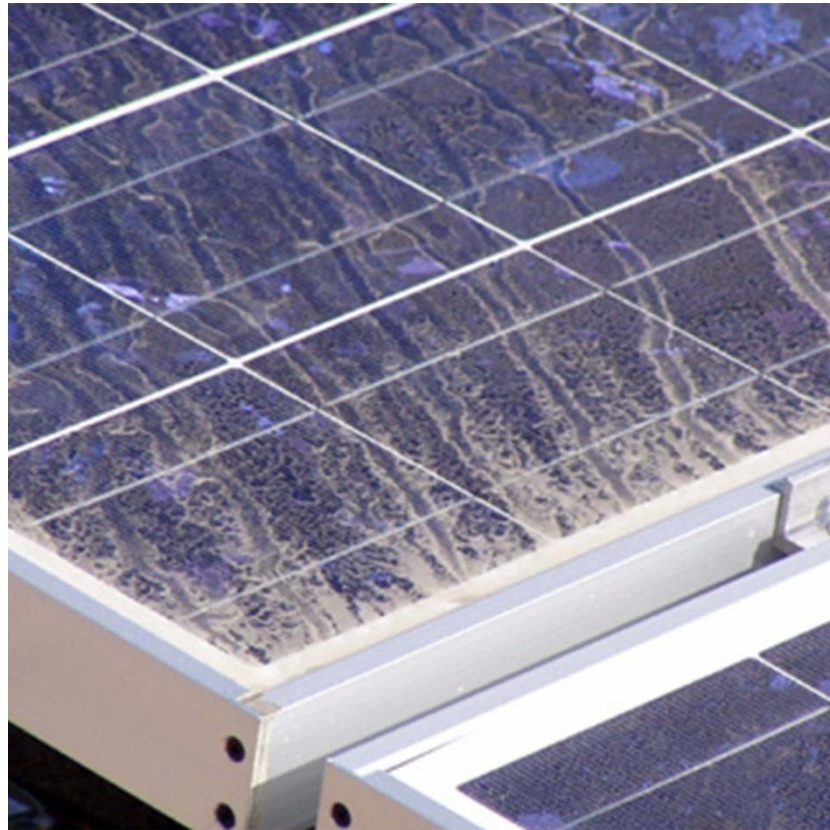


Рисунок 1.2 – Неоднорідне забруднення

Інше дослідження, проведене Мохамедом і Хасаном у 2012 р щодо впливу накопичення пилу на продуктивність фотоелектричних модулів в умовах Сахари, показало, що накопичення брудних об'єктів на сонячному модулі має значний вплив на вихідну потужність і загальну продуктивність системи. В іншому дослідженні, проведеному Dietz та ін. у 1963 р щодо впливу сонячного випромінювання на фотоелектричні панелі, показано, що 5% зменшення сонячного випромінювання через накопичення пилу на горизонтальному куті нахилу фотоелектричних панелей. Міхальський та ін. у 1988 р порівняли продуктивність двох пар сонячних фотоелектричних колекторів в Олбані, штат Нью-Йорк. Один з них мили щодня, тоді як інший залишали в спокої протягом двох місяців. Було виявлено, що панель, яку залишили на 2 місяці, дала менше 1% зниження вихідної потужності.

## **1.6 Висновки до розділу**

1. Розкрито історію розвитку фотоелектричних систем.
2. Проведено аналіз принципу роботи та ефективності сонячних елементів.
3. Проаналізовано вплив пилу на продуктивність фотоелектричних елементів, на основі аналізу досліджень, представлених у літературі.
4. Проаналізовано види пилу і шляхи його накопичення на поверхні сонячних фотоелектричних панелей.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Методика проведення експериментів

На рис. 2.1 показано алгоритм виконання досліджень, що був використаний при виконанні даної роботи. Отже планування роботи починається з огляду літератури, ознайомлення з системою, встановлення системи, запису даних, аналізу даних та формулювання висновків. Огляд літератури був використаний для вивчення передумов дослідницького проекту. Ознайомлення з системою фотоелектричних панелей є важливим перед проектуванням реального випробувального стенду.



Рисунок 2.1 – Алгоритм проведення досліджень

Проектування випробувального стенду залежало від вихідних параметрів, які необхідно було виміряти, а саме: опромінення сонячним світлом та вихідна потужність. Дані про вихідну потужність та опромінення були зібрані з системи для аналізу та інтерпретації результатів.

## 2.2 Експериментальна установка

На рис. 2.2 і 2.3 показано схему встановлення системи сонячних фотоелектричних панелей. Система була встановлена на біля приватного будинку у с.Іванчани Тернопільського району.

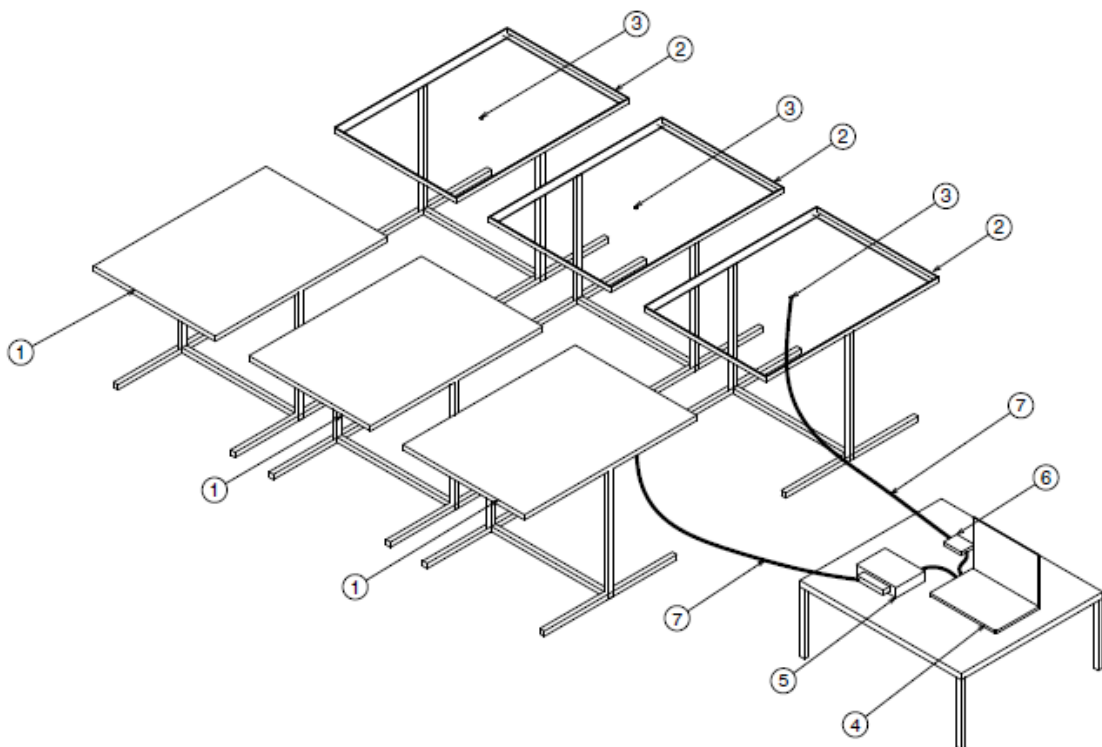


Рисунок 2.2 - Ізометричний вигляд системи сонячних фотоелектричних панелей

У цьому дослідженні використовувалася монокристалічні фотоелектричні панелі. Фотоелектричні панелі були підключені до Midi Data Logger, а скляні панелі з датчиками освітленості під поверхнею були підключені до мікроконтролера Arduino. У цьому дослідженні було проведено експеримент на відкритому повітрі для дослідження продуктивності фотоелектричних панелей

з точки зору вихідної потужності та опромінення сонячним світлом. Ці два набори панелей були використані для вимірювання продуктивності чистої панелі відносно забрудненої для погодинного, щоденного, щотижневого та щомісячного тестів. Для того, щоб визначити вплив пилу, що накопичився на поверхні, чиста панель постійно очищалася, в той час як забруднена панель очищалася через різні проміжки часу в залежності від необхідного тесту для даного проекту (погодинний, щоденний, щотижневий і щомісячний тест).

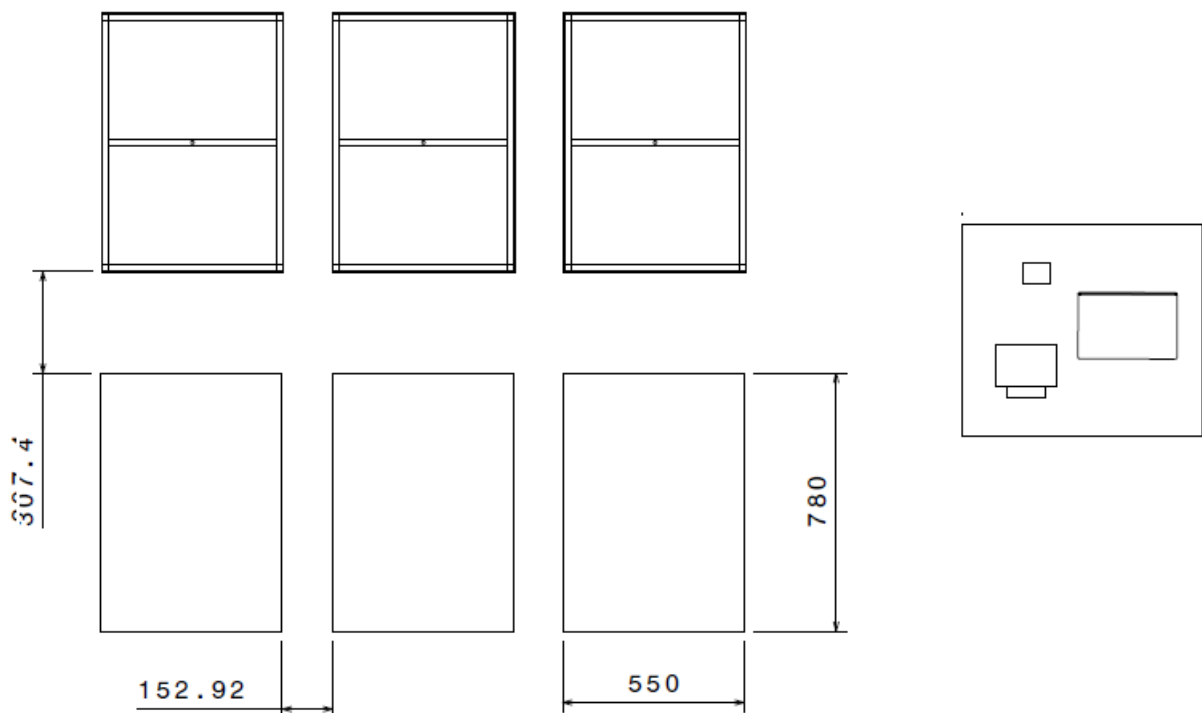


Рисунок 2.3 - Вигляд зверху системи сонячних фотоелектричних панелей з розмірами

З іншого боку, соляриметр і вольтметр використовувалися для вимірювання безпосередньо з панелі двох вихідних параметрів - сонячного випромінювання і вихідної потужності [10,11]. Ці вихідні параметри потребують додаткового параметра, яким була маса пилу. Оскільки маса кожної панелі становила 10 кг, під час проведення експерименту було використано додатковий шматок скла розміром 10 см на 10 см і товщиною 6 мм, оскільки вимірювальні ваги здатні вимірювати масу об'єктів лише до 2000 г. Чутливі вимірювальні ваги використовувалися для вимірювання маси пилу в кожному

експерименті. Для вимірювання маси пилу, що накопичився на чистій та забрудненій скляних панелях, використовували 2 шматочки скла. Для визначення маси пилу, різниця в масі між чистою та забрудненою панеллю вказувала на масу пилу, що накопичився на поверхні панелі.

### 2.3 Прилад для вимірювання випромінювання

На рис. 2.4 показано саморобний соляриметр. Система була створена шляхом поєднання та інтеграції мікроконтролера Arduino, друкованої плати та фотодіода. Фотодіод працює як датчик, який фіксує сонячне випромінювання під скляною панеллю і надсилає вхідний сигнал на мікроконтролер для обробки. Мікроконтролер Arduino - це серце системи. Він функціонує як мозок, перетворюючи вхідні дані, в даному випадку сонячне випромінювання, в цифрове значення, яке є величиною сонячного випромінювання. З'єднання між мікроконтролером і світлодіодом було здійснено за допомогою макетної плати. Макетна плата важлива для створення повної схеми. Для того, щоб змусити програму слідувати інструкціям, програмування мікроконтролера повинно бути зроблено спочатку перед запуском системи. Програмування системи було виконано з урахуванням двох входів, які надходили з чистої та запиленої панелі, і безперервним калібруванням значення для того, щоб зробити результат максимально точним [12,13]. Зразок програми мікроконтролера подано на рис. 2.5.

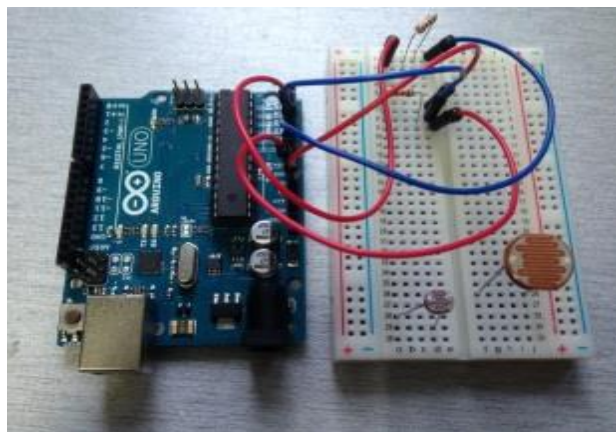


Рисунок 2.4 - Соляриметр

```

#define NUM_SAMPLES 10
int sum = 0;
unsigned char sample_count = 0;
float voltage = 0.0;
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
    while (sample_count < NUM_SAMPLES) {
        sum += analogRead(A2);
        sample_count++;
        delay(10);
    }
    voltage = ((float)sum / (float)NUM_SAMPLES * 5.015) / 1024.0;
    Serial.print(voltage * 11.132);
    Serial.println ("V");
    sample_count = 0;
    sum = 0;
}

```

Рисунок 2.5 - Зразок програми соляриметра для мікроконтролера

## 2.4 Блок-схема системи реєстрації характеристик сонячних фотоелектричних панелей та випромінювання

На рис. 2.6 показано блок-схему підключення сонячних фотоелектричних панелей та скляних панелей до комп'ютера для збору та реєстрації даних. На схемі показано, як проводилися експерименти. Загалом, під час проведення експерименту було використано три пари панелей. Перша панель - це сонячна фотоелектрична панель, а друга панель - це скляна макетна панель. Обидві ці панелі використовувалися для вимірювання продуктивності системи сонячних фотоелектричних панелей з точки зору сонячного випромінювання та вихідної потужності, що генерується фотоелектричними панелями. Для того, щоб виміряти продуктивність сонячних фотоелектричних панелей у кількісній шкалі вимірювання, у цьому дослідженні було враховано накопичення пилу. Масу пилу вимірювали, зваживши брудну скляну панель і порівнявши її з чистою панеллю. Різниця між ними вказувала на масу накопичення пилу. Під час проведення всіх експериментів порівнювали чисту та запилену панелі.

Чисту сонячну фотоелектричну панель постійно чистили, а забруднену залишали для накопичення пилу відповідно до різних тестів. Наприклад, панель для щотижневого тесту залишали накопичувати пил протягом кожного тижня, а в кінці тижня записували відповідні дані і порівнювали їх з чистою панеллю.

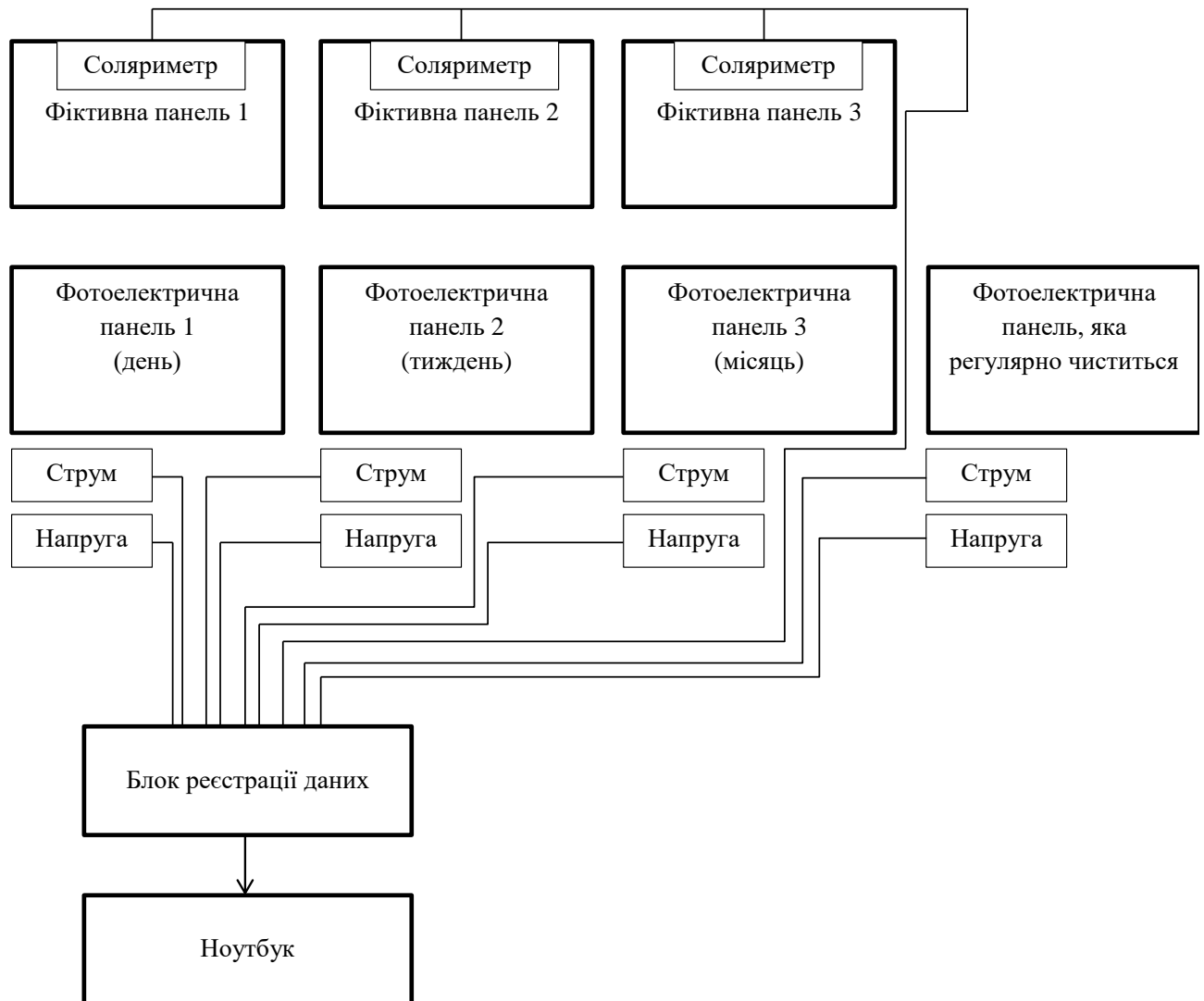


Рисунок 2.6 - Блок-схема експериментальної сонячної фотоелектричної системи

## 2.5 Висновки до розділу

1. Описано методику проведення експериментів з дослідження впливу пилу на ефективність фотоелектричних панелей. Сформульовано алгоритм роботи.



2. Описано місце проведення експериментів та установку на базі монокристалічних фотоелектричних панелей.

3. Представлено конструкцію виготовленого самостійно соляриметра, який використовувався для порівняння інтенсивності сонячного випромінювання у експериментах.

4. Розроблено блок-схему підключення сонячних фотоелектричних панелей та скляних панелей до комп'ютера для збору та реєстрації даних.

### **3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ**

#### **3.1 Погодинне дослідження фотоелектричних панелей**

##### **3.1.1 Зміна вихідної потужності та опромінення з часом при погодинному тестуванні**

На рис. 3.1 показано зміну вихідної потужності та опромінення в залежності від часу для погодинного тесту 1. Погодинний тест проводився тричі. Перший погодинний тест було проведено 04 квітня 2023 року. Було відмічено, що під час проведення всіх тестів погода була сприятливою, оскільки не було дощу і туману в ці дні. Погодинні випробування проводилися з 10 ранку до 6 вечора. Було дві пари панелей: скляні манекени та сонячні фотоелектричні панелі. Скляні манекени використовувалися для вимірювання випромінювання під скляними панелями для чистих і запилених панелей, тоді як сонячні фотоелектричні панелі використовувалися для вимірювання вихідної потужності для чистих і запилених панелей. Загалом, перша пара панелей залишалася нечистою протягом 1 години, а друга пара панелей була завжди чистою. Показники вимірювалися безперервно протягом дня. На рис. 3.1 зелена лінія показує чисту вихідну потужність, тоді як фіолетова лінія показує запилену вихідну потужність. З отриманого результату видно, що між чистою та запиленою вихідною потужністю майже не було суттєвої різниці. Обидві лінії накладалися одна на одну. Це було пов'язано з періодичністю очищення щогодини. Пил, що накопичився на запилених панелях, очищався щогодини. Також не було виявлено значних відхилень під час тесту в годину пік з 12:00 до 15:00. З іншого боку, випромінювання від скляних фіктивних панелей, як показано синьою лінією (чиста панель) і червоною (запилена панель), також не виявило суттєвої різниці між цими двома лініями. Обидві лінії накладалися одна на одну. Це також було пов'язано з меншою частотою прибирання щогодини. Крім того, зміна вихідної потужності та випромінювання мала таку саму картину, особливо в години пікового навантаження з 12:00 до 15:00 та в

непікові години з 16:00 до 17:00. Зміна двох параметрів - вихідної потужності та випромінювання - мала однакову закономірність, оскільки панелі отримували однакову кількість сонячного випромінювання. Крім того, всі дві пари панелей були розташовані поруч таким чином, що всі панелі отримували однакову кількість сонячного випромінювання. Розташування фотоелектричних панелей і їх установку можна побачити в розділі 2.3.

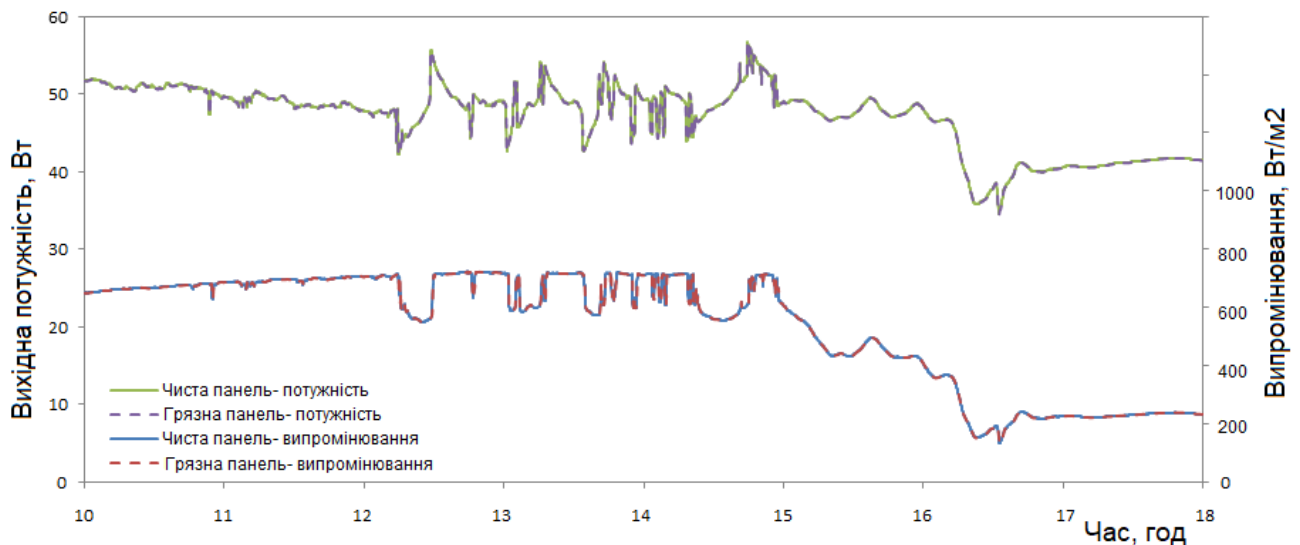


Рисунок 3.1 - Зміна вихідної потужності та опромінення з часом для годинного тесту 1

### 3.1.2 Зміна продуктивності фотоелектричних панелей з часом при погодинному тестуванні

На рис. 3.2 показано зміну падіння продуктивності з часом для годинного тесту 1. Результат, як на рис.3.2, був отриманий з результату на рис. 3.1, зміни вихідної потужності та випромінювання з часом. Різниця між чистими і запиленими панелями для вихідної потужності і випромінювання представлена на рис. 3.2. Синя лінія вказує на падіння продуктивності вихідної потужності, а червона лінія вказує на падіння продуктивності випромінювання. З отриманого результату видно, що пікове падіння продуктивності вихідної потужності та випромінювання відбулося близько 17:00. Цей результат можна співвіднести з

рис. 3.1, де о 17:00 інтенсивність сонячного випромінювання в цей період була нижчою. З іншого боку, середнє падіння продуктивності за вихідною потужністю становило близько 0,04 %, тоді як середнє падіння продуктивності за опроміненням становило близько 0,01 %. Теоретично падіння продуктивності вихідної потужності та випромінювання має бути однаковим, однак через низьку ефективність сонячних фотоелектричних панелей, що використовувалися, спостерігався розрив між цими двома лініями.

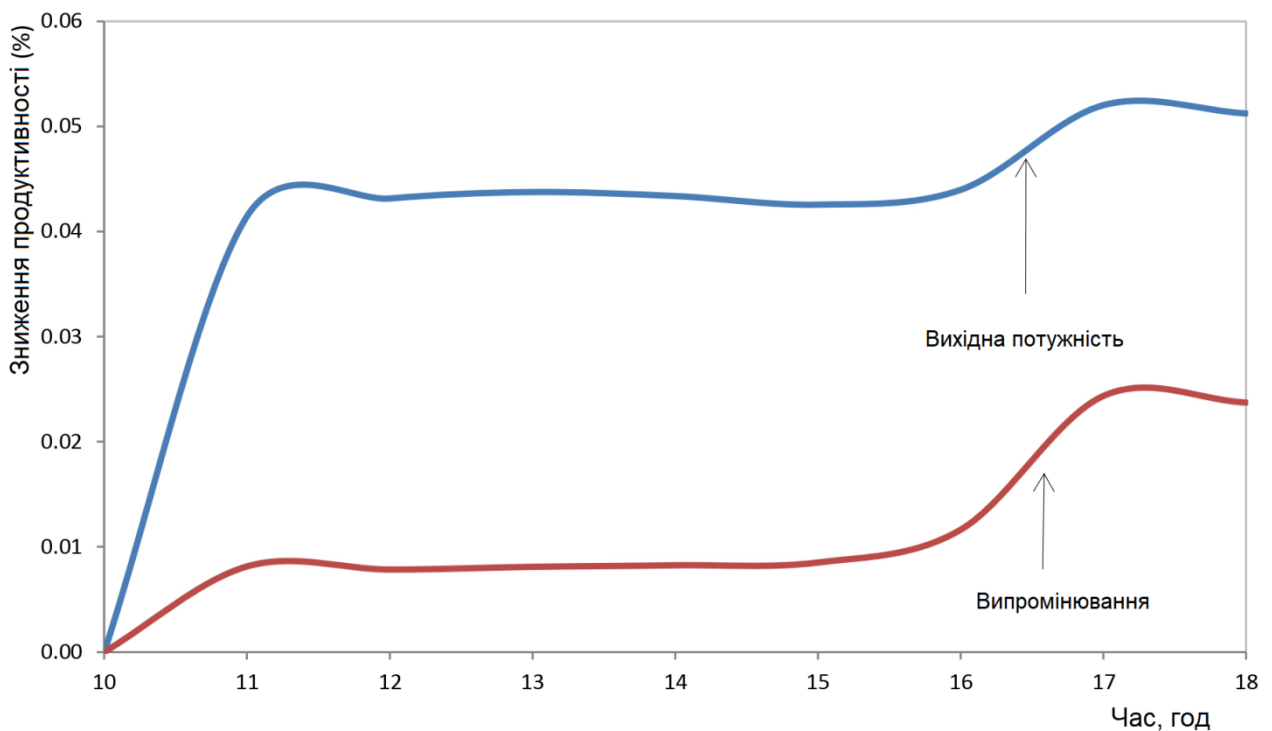


Рисунок 3.2 - Зміна продуктивності з часом на годинному тесті 1

### 3.1.3 Розподіл маси пилу з часом при погодинному тестуванні

На рис. 3.3 показано розподіл маси пилу з часом. Маса пилу збиралася з запиленої панелі щогодини, починаючи з 10 ранку до 6 вечора. Чутливі ваги використовувалися для вимірювання маси пилу, що накопичується на сонячному фотоелектричному колекторі. Різниця між показниками пилу на чистих панелях вказує на масу пилу, що накопичується на сонячному фотоелектричному колекторі. Синя смуга вказує на масу пилу за кожен годину,

а червона лінія вказує на теоретичну накопичену масу пилу. З отриманого результату видно, що середня маса пилу, що накопичилася під час погодинного тесту, становила близько 0,02 г на 0,01 м<sup>2</sup> площі панелі. Найбільша маса пилу спостерігалася о 17:00. Було помічено, що близько 17:00 швидкість вітру була вищою, і це сприяло накопиченню пилу на панелях. Теоретично, маса пилу, що накопичується на сонячному фотоелектричному колекторі з 10 ранку до 6 вечора, становить близько 0,17 г на 0,01 м<sup>2</sup> площі панелей. Маса пилу, накопиченого на чистій панелі, поступово збільшувалася протягом дня.

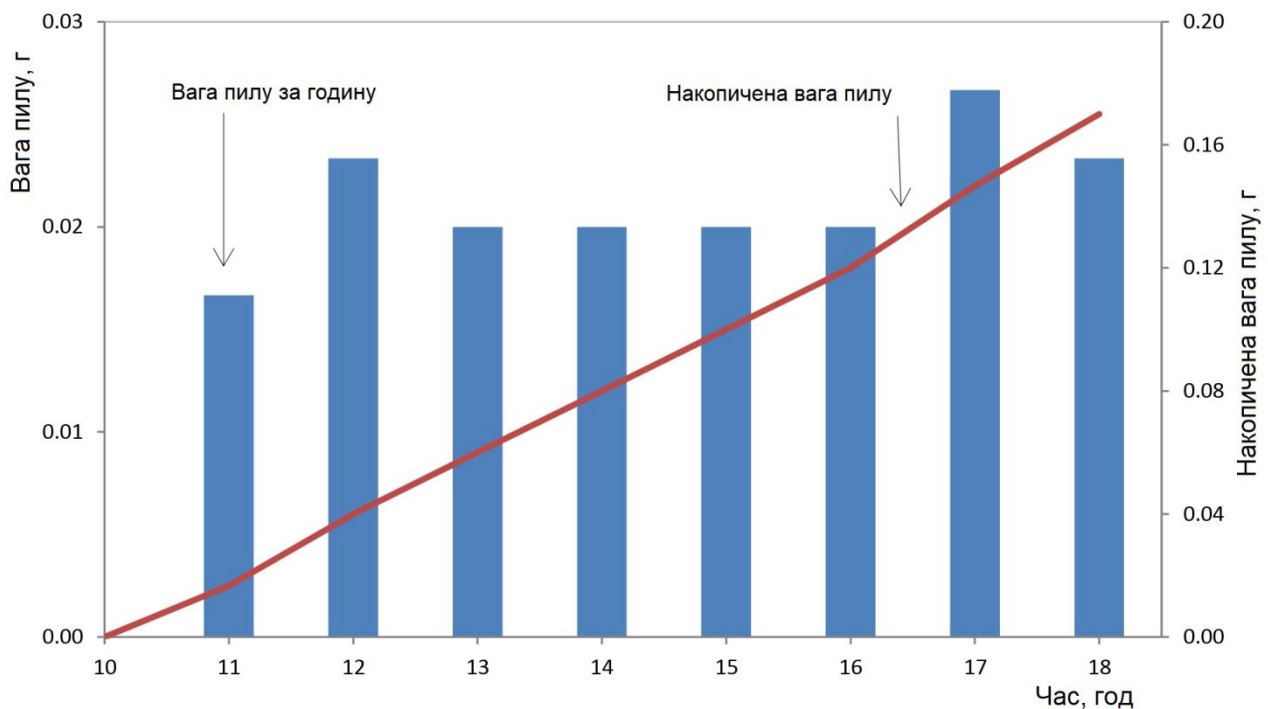


Рисунок 3.3 - Розподіл пилу з часом на щогодинному тесті 1

### 3.1.4 Підсумки погодинних випробувань на опромінення

На рис. 3.4 показано підсумок усіх погодинних тестів на опромінення. Синя смуга вказує на випромінювання від чистої панелі, а червона смуга вказує на випромінювання від запиленої панелі. Скляні манекени були використані для отримання даних про випромінювання сонячного світла під скляними панелями. Погодинні випробування проводилися 04 квітня 2023 року з 10 ранку до 6 вечора. Було відмічено, що під час проведення погодинних випробувань

погода була сприятливою, оскільки на вулиці не було дощу і туману. В результаті було виявлено, що погодинне випробування 2 мало найвище значення випромінювання порівняно з погодинними випробуваннями 3 і 1. З іншого боку, різниця у значенні випромінювання для чистої і запиленої панелі для погодинних випробувань 1, 2 і 3 була однаковою для всіх випробувань і становила  $0,32 \text{ Вт/м}^2$ , а декремент для всіх випробувань становив  $0,015 \%$ . Таким чином, середня різниця у значенні випромінювання для чистої та запиленої панелі для всіх годинних тестів становила  $0,32 \text{ Вт/м}^2$ , а падіння продуктивності випромінювання становило  $0,015 \%$ .

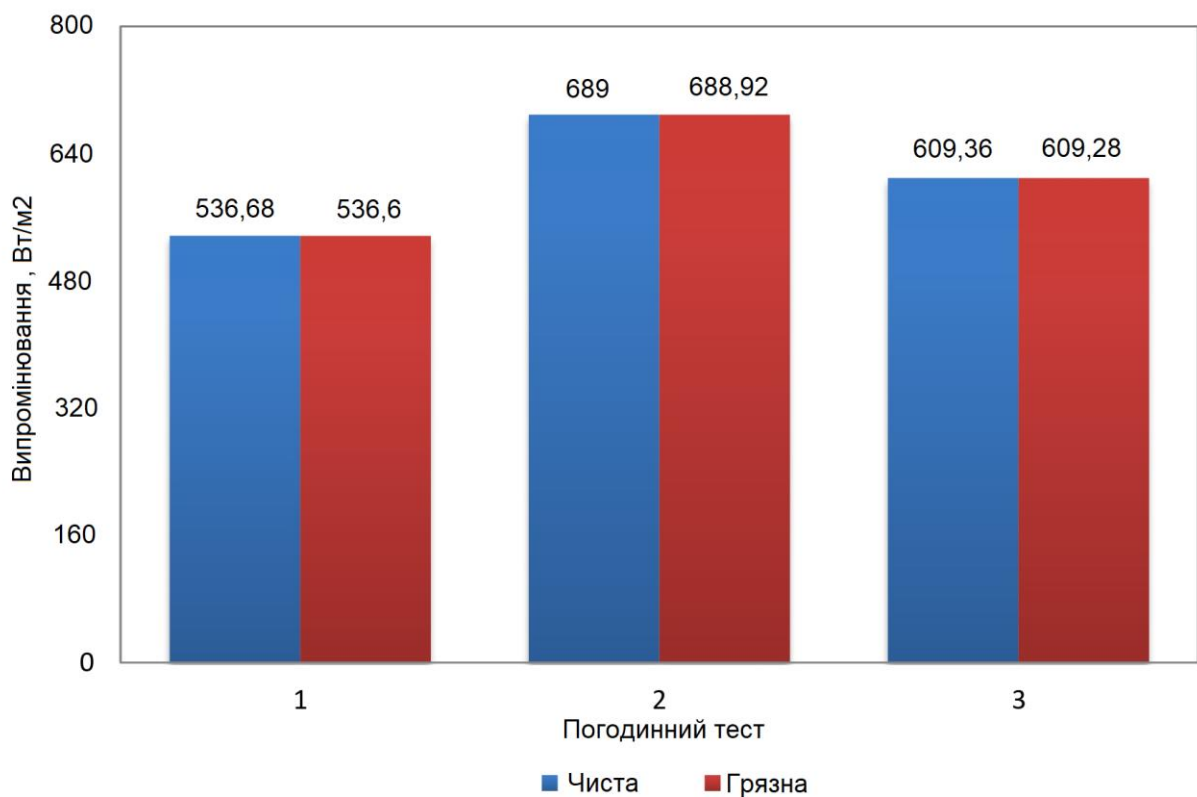


Рисунок 3.4 - Опромінення чистих і запилених панелей під час погодинного тесту

### 3.1.5 Підсумок погодинних тестів на вихідну потужність

На рис. 3.5 показано підсумок усіх погодинних тестів на вихідну потужність. Синя смуга показує вихідну потужність чистої панелі, а червона смуга - вихідну потужність запиленої панелі. Сонячні фотоелектричні панелі були використані для вимірювання вихідної потужності чистих і запилених

панелей. За результатами було виявлено, що найбільше значення вихідної потужності має погодинний тест 2, за яким слідує погодинні тести 3 і 1. За результатами було виявлено значну різницю між вихідною потужністю чистих і запилених панелей, особливо для погодинного тесту 1. Для годинного тесту 1 різниця між чистими і запиленими панелями становила 0,03 Вт, а падіння продуктивності від вихідної потужності - 0,06 %. Для годинних тестів 2 і 3 різниця у вихідній потужності становила 0,02 Вт, а зниження продуктивності для годинних тестів 2 і 3 становило 0,04 %. Загалом, середня різниця у вихідній потужності для чистої та запиленої панелі для всіх годинних тестів становила 0,021 Вт, а падіння продуктивності при опроміненні - 0,014 %.

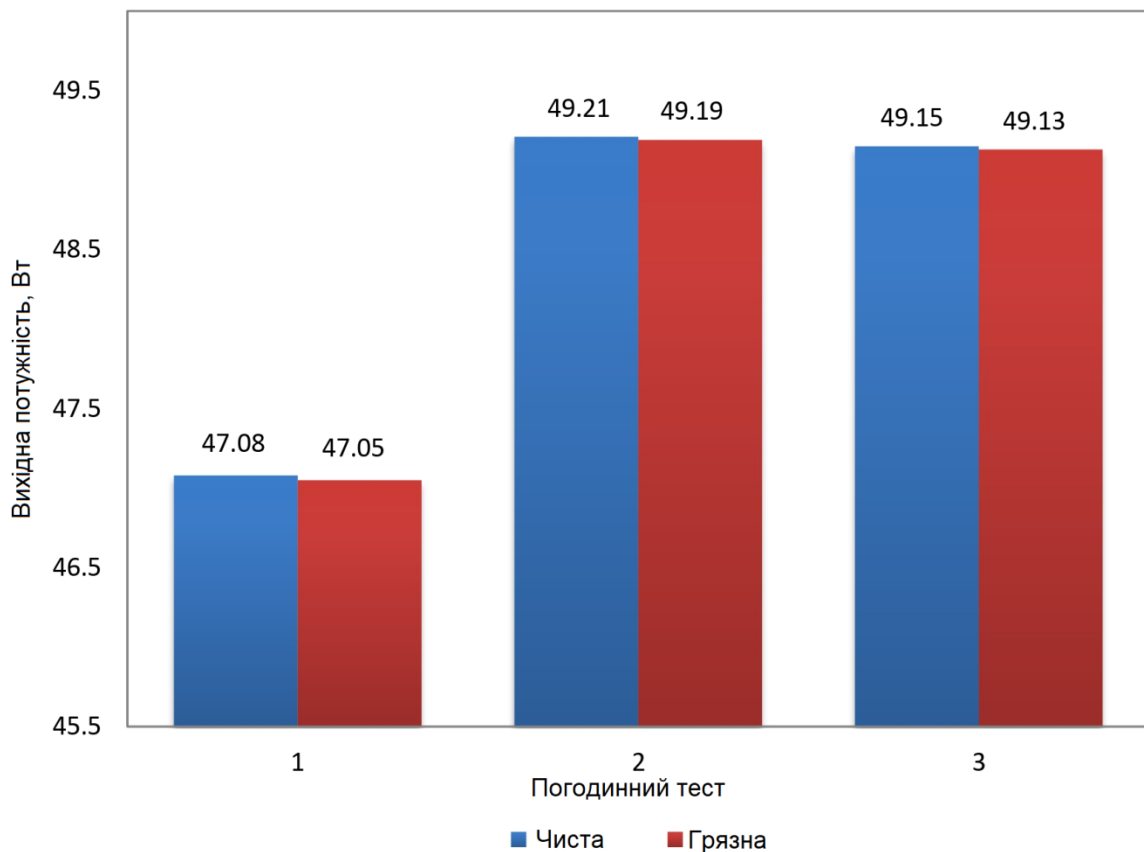


Рисунок 3.5 - Вихідна потужність для чистих і запилених панелей під час погодинного тесту

### 3.1.6 Падіння продуктивності сонячних фотоелектричних панелей при погодинному тестуванні

На рис. 3.6 показано падіння продуктивності при опроміненні та вихідної потужності для щоденних тестів. Падіння продуктивності вимірювалося шляхом порівняння очищених панелей з запиленими.

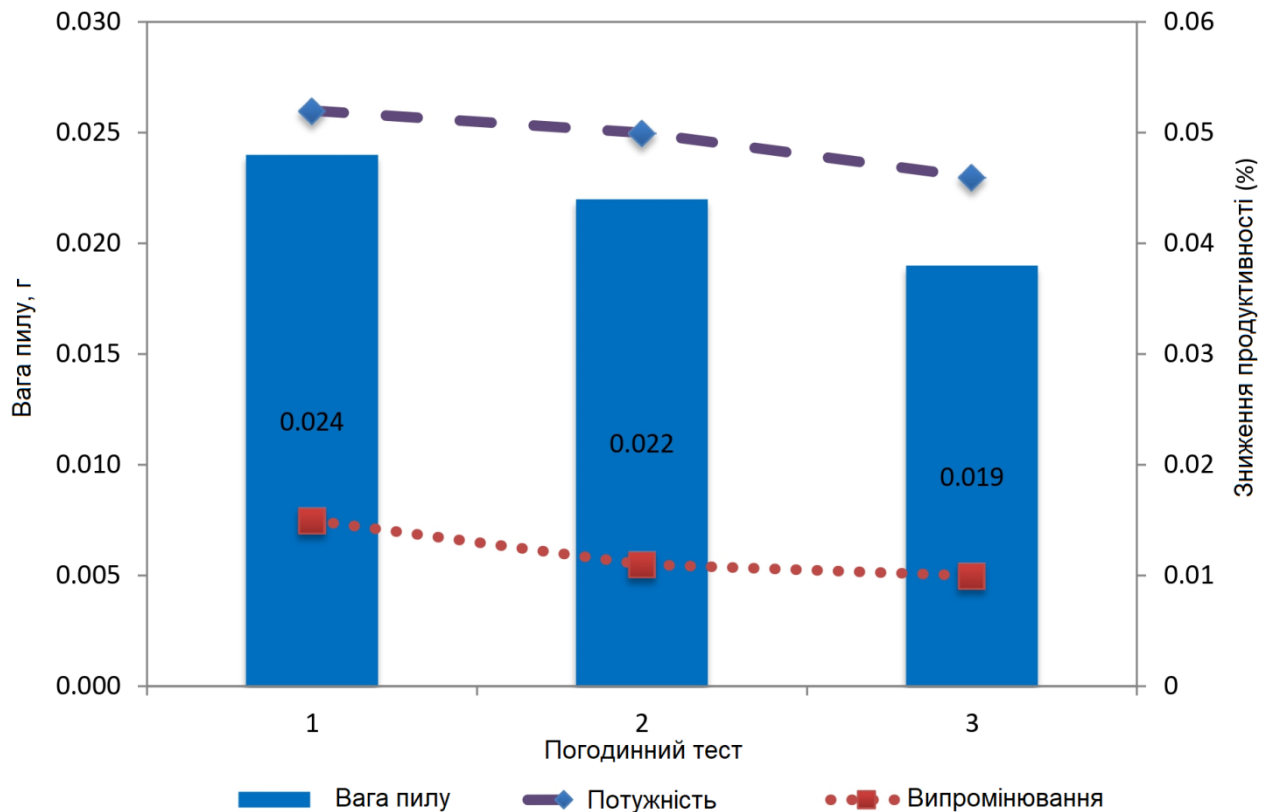


Рисунок 3.6 - Зменшення продуктивності зі збільшенням маси пилу під час погодинного тесту

Було відмічено, що під час проведення всіх годинних тестів ззовні будівлі не було дощу і туману. З отриманих результатів було виявлено, що найбільше падіння вихідної потужності та випромінювання відбулося під час погодинного тесту 1, за яким слідували погодинні тести 2 і 3. Це було пов'язано з тим, що кількість пилу, накопиченого на сонячних фотоелектричних панелях для погодинного тесту 1, була вищою порівняно з нашими тестами 2 і 3. Чим більше пилу накопичується на сонячному колекторі, тим більше падає продуктивність системи сонячних фотоелектричних панелей. Крім того,



характер падіння продуктивності вихідної потужності та випромінювання був однаковим, проте між ними існував розрив. Вважалося, що ефективність використовуваного сонячної фотоелектричної панелі була низькою, і саме тому вона показувала різницю у вихідній потужності. Загалом, середній показник падіння вихідної потужності становив близько 0,05 %, тоді як для випромінювання - близько 0,01 %, а середня маса пилу, накопиченого під час годинного тесту, становила близько 0,022 г на 0,01 м<sup>2</sup>.

### 3.2 Щоденне (добове) дослідження фотоелектричних панелей

#### 3.2.1 Зміна вихідної потужності та випромінювання з часом при щоденному тестуванні

На рис. 3.7 показано зміну вихідної потужності та випромінювання з часом для щоденного тесту 1. Щоденний тест проводився тричі. Перший результат щоденного тестування представлено в цьому розділі, а решта - в додатках.

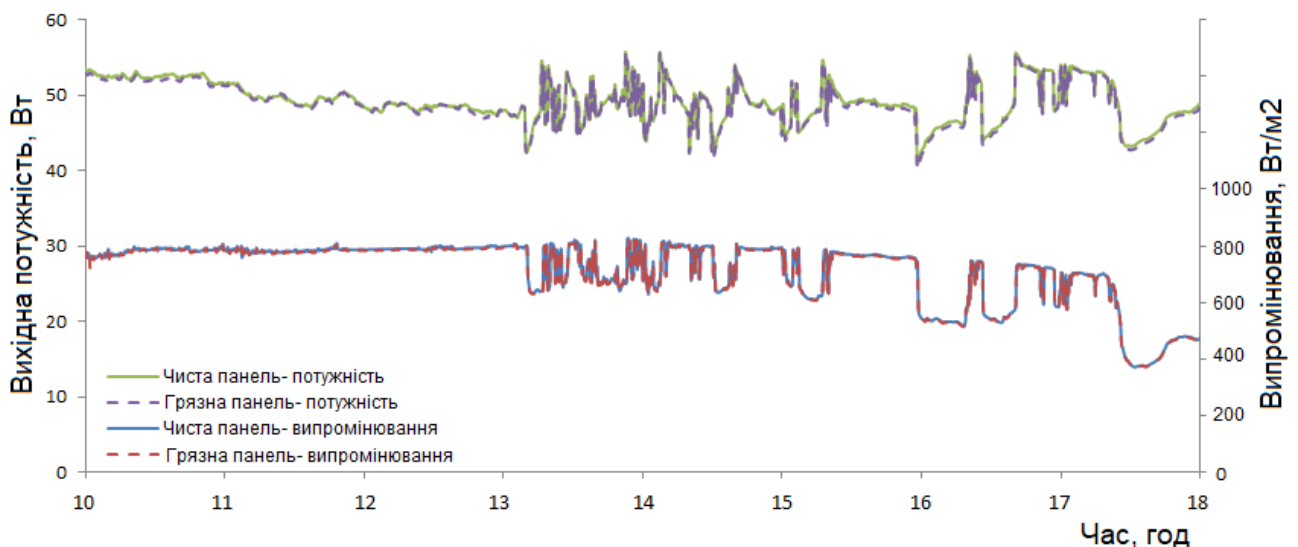


Рисунок 3.7 - Зміна вихідної потужності та опромінення з часом під час щоденного тесту 1

Перший щоденний тест був проведений 05 квітня 2023 року, продовження щоденних тестів 2 і 3 - 06 і 07 квітня 2023 року відповідно. Під

час проведення всіх тестувань погода була сприятливою, оскільки протягом трьох днів не було дощу і туману. Щоденні випробування проводилися з 10 ранку до 6 вечора. Було дві пари панелей: скляні макети та сонячні фотоелектричні панелі. Першу пару панелей залишали нечищеною на один день, а другу пару панелей завжди чистили. Показники були зняті після того, як пил, що накопичився за один день, не був очищений. З отриманих результатів видно, що різниця між чистими і запиленими панелями за вихідною потужністю і випромінюванням була дуже незначною. Крім того, зміни вихідної потужності та випромінювання мали однакову картину, особливо протягом години з 13:00 до 18:00.

### **3.2.2 Зміна падіння продуктивності з часом при щоденному тестуванні**

На рис.3.8 показано зміну падіння продуктивності з часом для щоденного тесту 1. Результат, як і на рис. 3.8, було отримано з результату на рис. 3.9, зміни вихідної потужності та випромінювання з часом. Різниця між чистими і запиленими панелями для вихідної потужності і випромінювання була представлена на рис.3.8. Синя лінія вказує на падіння продуктивності вихідної потужності, а червона лінія вказує на падіння продуктивності випромінювання. З отриманих результатів видно, що найбільше падіння продуктивності вихідної потужності та випромінювання відбулося близько 14:00, а найменше падіння продуктивності - о 15:00. Цей результат можна співвіднести з рис.3.7, де з 13:00 до 15:00 був пік сонячного випромінювання на сонячний колектор. З іншого боку, середнє падіння продуктивності за вихідною потужністю становило близько 0,4 %, тоді як середнє падіння продуктивності за опроміненням становило близько 0,35 %.

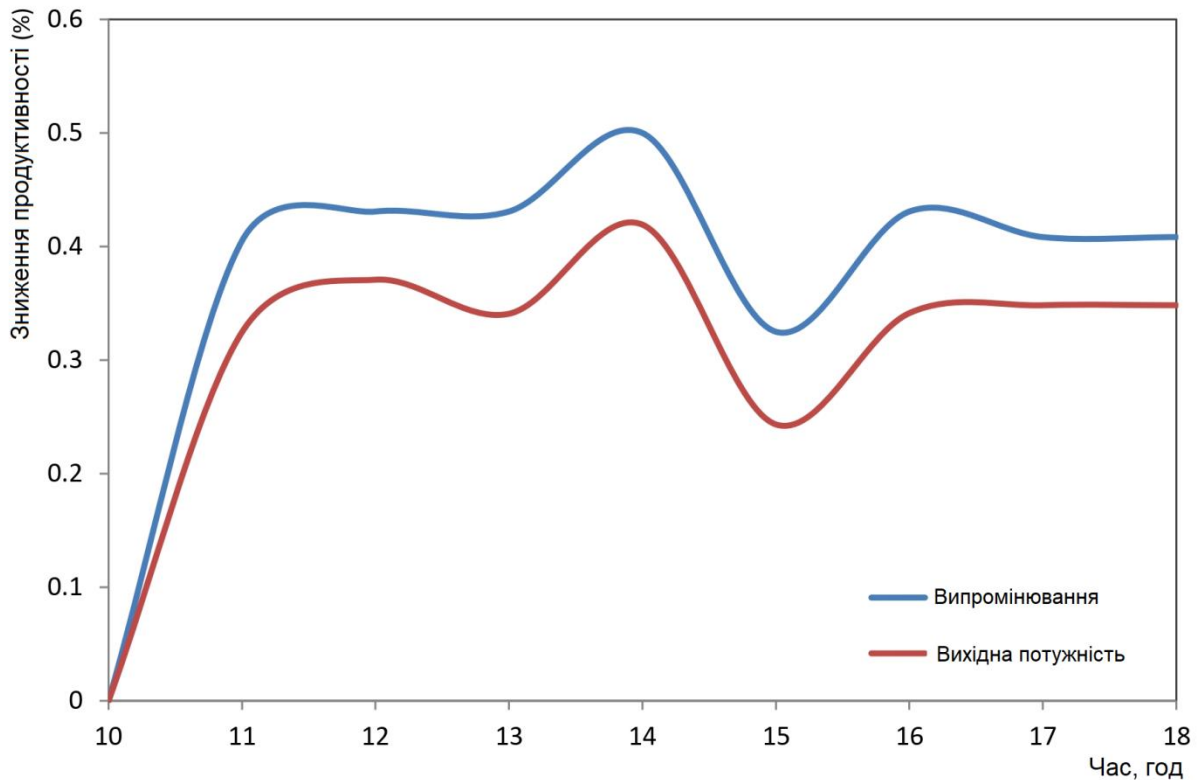


Рисунок 3.8 - Зміна падіння продуктивності з часом під час щоденного тесту 1

### 3.2.3 Підсумок щоденних тестів на випромінювання

На рис. 3.9 показано підсумок усіх щоденних тестів на опромінення. Синя смужка вказує на випромінювання від чистої панелі, а червона смужка вказує на випромінювання від запиленої панелі. Скляні манекени були використані для отримання даних про випромінювання сонячного світла під скляними панелями. Щоденні випробування проведені 05 травня 2023 року, продовження щоденних тестів 2 і 3 - 06 і 07 травня 2023 року відповідно, випробування проводилися з 10 ранку до 6 вечора. Було помічено, що під час проведення щоденних тестів погода була сприятливою для проведення кожного годинного тесту, оскільки на вулиці не було дощу і туману. В результаті було виявлено, що щоденний тест 2 мав найвище значення випромінювання порівняно з щоденними тестами 3 і 1. З іншого боку, різниця у значенні випромінювання для чистої і запиленої панелі для годинних тестів 1 і 2 була однаковою для всіх

тестів і становила  $3,6 \text{ Вт/м}^2$ , тоді як тест 3 показав різницю у значенні випромінювання у  $2,4 \text{ Вт/м}^2$ . Таким чином, середня різниця у значенні випромінювання для чистої та запиленої панелі для всіх годинних тестів становила близько  $3,2 \text{ Вт/м}^2$ .

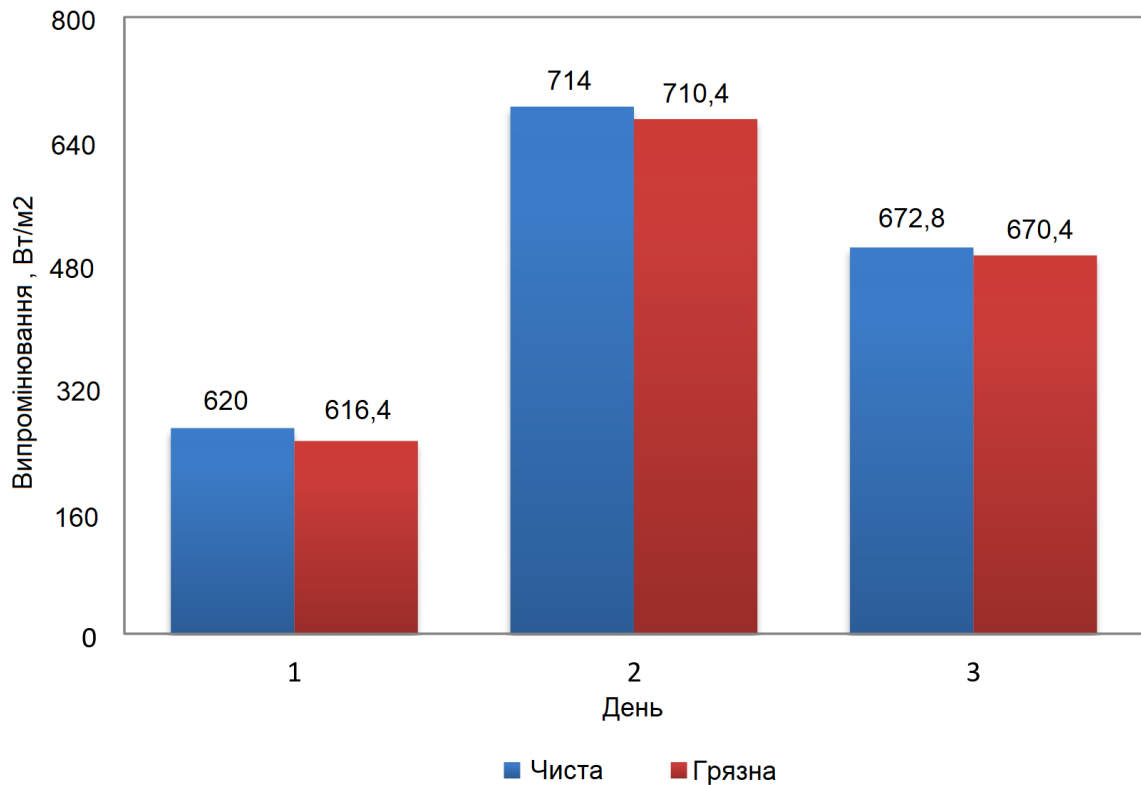


Рисунок 3.9 - Випромінювання для чистих і заплених панелей під час щоденного тесту

### 3.2.4 Підсумок щоденних тестів на вихідну потужність

На рис.3.10 показано підсумок усіх щоденних тестів вихідної потужності. Синя смуга вказує на вихідну потужність чистої панелі, а червона смуга - на вихідну потужність запиленої панелі. Сонячні фотоелектричні панелі були використані для вимірювання вихідної потужності чистих і заплених панелей. В результаті було виявлено, що щоденний тест 2 мав найвище значення вихідної потужності, за яким слідували погодинні тести 3 і 1. В результаті було виявлено значну різницю між вихідною потужністю чистих і заплених панелей, особливо в щоденних тестах 1 і 3. Для щоденного тесту 1 різниця між

чистими і запиленими панелями становила 0,03 Вт, а падіння продуктивності від вихідної потужності - 0,61 %. Для годинного тесту 2 різниця у вихідній потужності становила 0,2 Вт, а зниження продуктивності - близько 0,4 %, для щоденного тесту 3 різниця становила близько 0,3 Вт, а зниження - 0,6 %. Загалом, середня різниця у вихідній потужності для чистої та запиленої панелі для всіх щоденних тестів становила 0,26 Вт, а падіння продуктивності при опроміненні - 0,53 %.

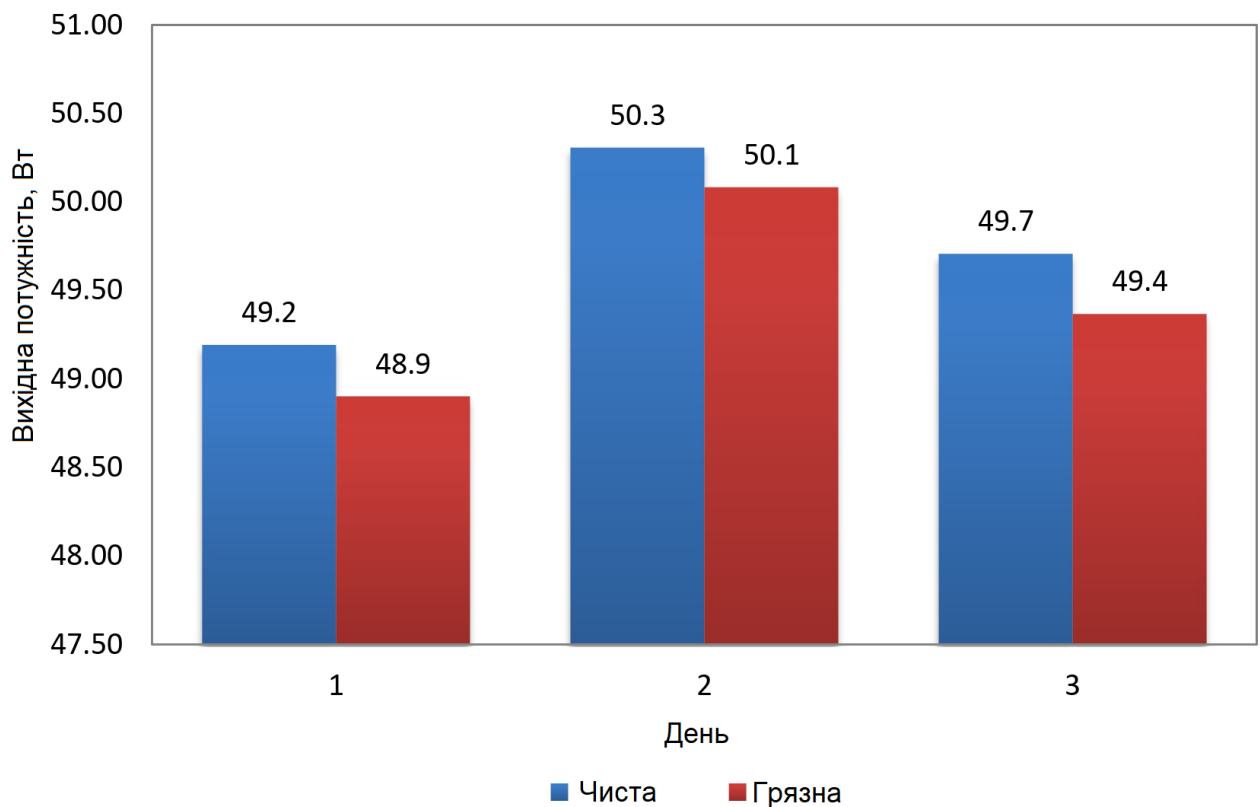


Рисунок 3.10 - Потужність для чистих і запилених панелей

### 3.2.5 Падіння продуктивності сонячних фотоелектричних панелей при щоденному тестуванні

На рис. 3.11 показано падіння продуктивності при опроміненні та вихідної потужності для щоденних тестів. Падіння продуктивності вимірювалося шляхом порівняння чистих панелей з запиленими. Було помічено, що під час проведення всіх щоденних тестів не було дощу і туману на зовнішній стороні будівлі. З отриманих результатів було виявлено, що

щоденний тест 3 мав найбільше падіння продуктивності вихідної потужності та випромінювання, за яким слідували щоденні тести 1 і 2. Це було пов'язано з кількістю пилу, що накопичився на сонячних фотоелектричних панелях. Щоденний тест 1 мав найбільше падіння продуктивності порівняно з щоденними тестами 1 і 2. Чим більше пилу накопичується на сонячному колекторі, тим більше падає продуктивність системи сонячних фотоелектричних панелей. Крім того, характер падіння продуктивності вихідної потужності та випромінювання був однаковим, проте між ними існував розрив. Вважалось, що ефективність використовуваного сонячного фотоелектричного колектора була низькою, і саме тому він показував різницю у вихідній потужності. Загалом, середній показник падіння вихідної потужності становив близько 0,5 %, тоді як для опромінення - близько 0,4 %, а середня маса пилу, накопиченого під час годинного тесту, становила близько 0,025 г на 0,01 м<sup>2</sup>.

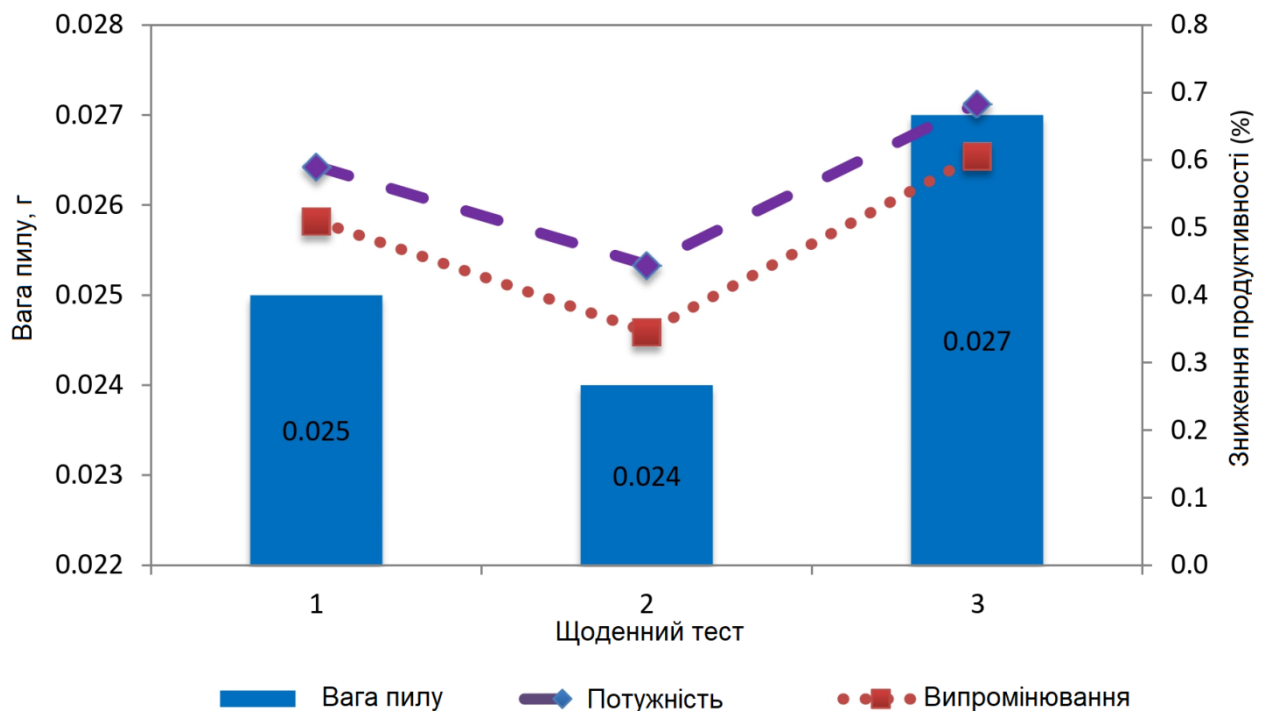


Рисунок 3.11 - Зниження продуктивності та маса пилу при щоденному тестуванні

### 3.3 Тижневе випробування

#### 3.3.1 Зміна вихідної потужності та опромінення з часом під час тижневого випробування

На рис. 3.12 показано зміну вихідної потужності та опромінення з часом для тижневого випробування 1. Тижневе випробування проводилося тричі. Перший результат щотижневого тесту представлено в цьому розділі, а решта - в додатках. Щотижневий тест 1 було проведено 10 квітня 2023 року, щотижневий тест 2 – 17 квітня 2023 року та щотижневий тест 3 - 24 квітня 2023 року відповідно. Під час проведення всіх тестувань погода була сприятливою, оскільки в ці дні не було дощу і туману. Щотижневі випробування проводилися з 10 ранку до 6 вечора. Для вимірювання випромінювання та вихідної потужності використовувалися дві пари панелей, які склалися зі скляних манекенів та сонячних фотоелектричних панелей. Перша пара панелей залишалася нечищеною протягом одного тижня, а друга пара панелей завжди була чистою. Показники були зняті після того, як пил, що накопичився за тиждень без очищення, вивітрився. З отриманого результату видно, що було велике відхилення вихідної потужності порівняно з випромінюванням для чистих і запилених панелей.

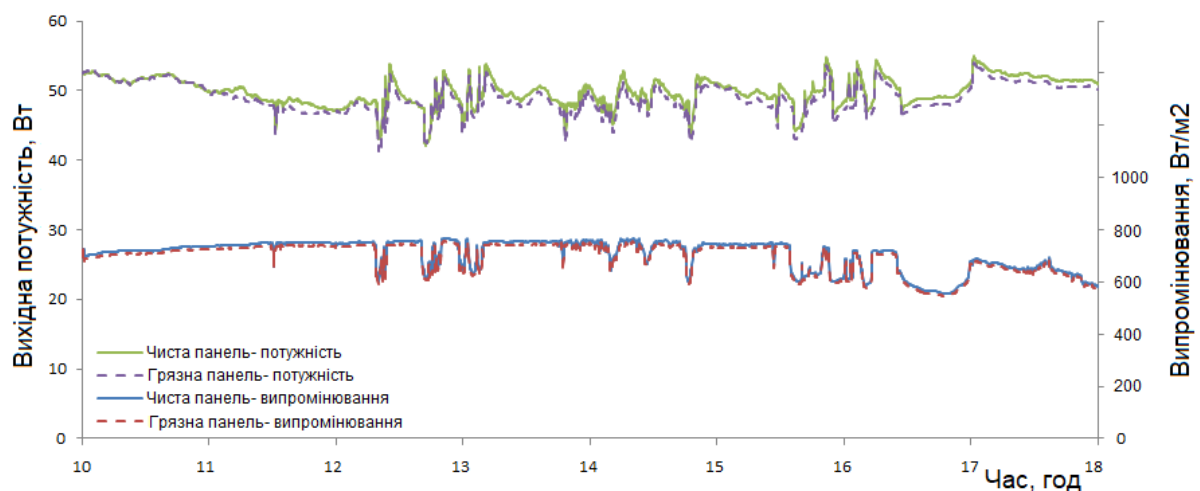


Рисунок 3.12 - Зміна вихідної потужності та опромінення з часом для щотижневого тесту 1

### 3.3.2 Зміна падіння продуктивності з часом під час щотижневого тесту

На рис. 3.13 показано зміну падіння продуктивності з часом для щотижневого тесту 1. Результат, як на рис. 3.13, було отримано з результату на рис.3.12, зміни вихідної потужності та опромінення з часом. Різниця між чистими і запиленими панелями за вихідною потужністю і випромінюванням представлена на рис. 3.13. Синя лінія вказує на падіння продуктивності вихідної потужності, а червона лінія вказує на падіння продуктивності випромінювання. З отриманих результатів видно, що найбільше падіння продуктивності вихідної потужності та випромінювання відбулося близько 16:00, а найменше падіння продуктивності - о 13:00. З іншого боку, середнє падіння продуктивності вихідної потужності становило близько 0,7 %, а середнє падіння продуктивності випромінювання - близько 0,6 %.

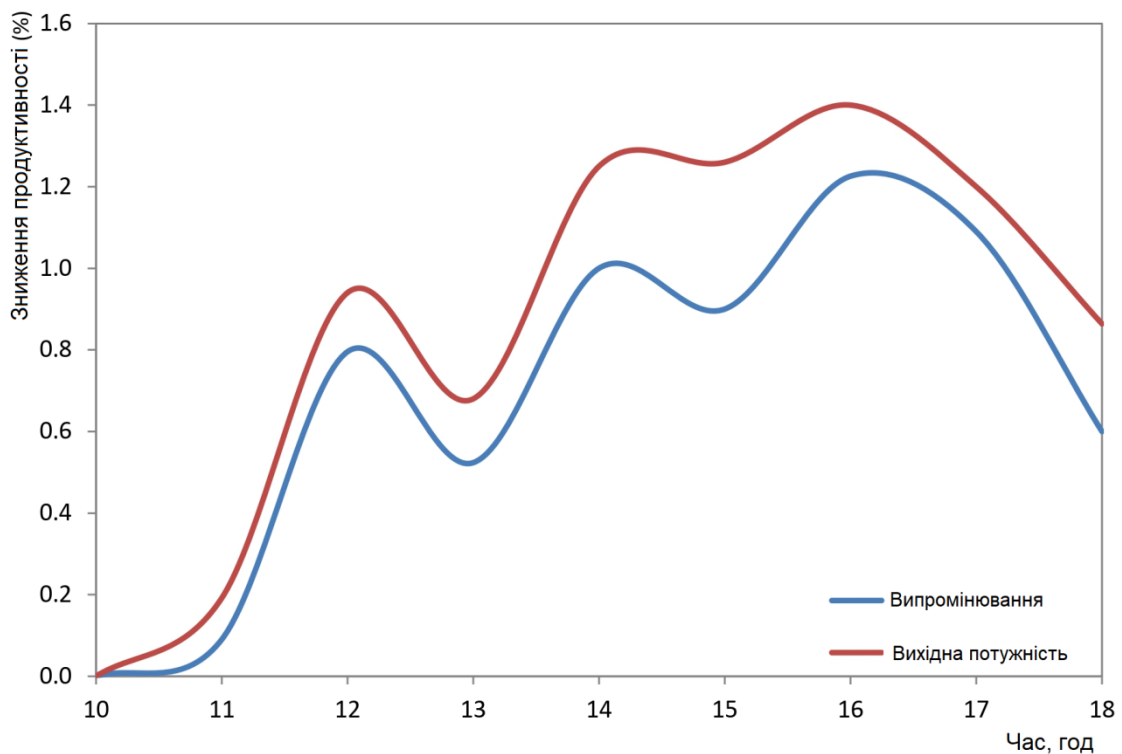


Рисунок 3.13 - Зміна падіння продуктивності з часом для щотижневого тесту 1



### 3.3.3 Підсумки щотижневих тестів на опромінення

На рис. 3.14 показано підсумок усіх щотижневих тестів випромінювання. Синя смужка вказує на випромінювання від чистої панелі, а червона смужка вказує на випромінювання від запиленої панелі. Скляні манекени були використані для отримання даних про випромінювання сонячного світла під скляними панелями. З результатів було виявлено, що щотижневий тест 2 мав найвище значення випромінювання порівняно з щоденними тестами 3 і 1. З іншого боку, різниця у значенні випромінювання для чистої і запиленої панелі для щотижневих тестів 1, 2 і 3 становила  $5,6 \text{ Вт/м}^2$ ,  $6 \text{ Вт/м}^2$  і  $6,8 \text{ Вт/м}^2$ . У підсумку, середня різниця у значенні випромінювання для чистої і запиленої панелі для всіх щоденних тестів становила близько  $6,12 \text{ Вт/м}^2$ .

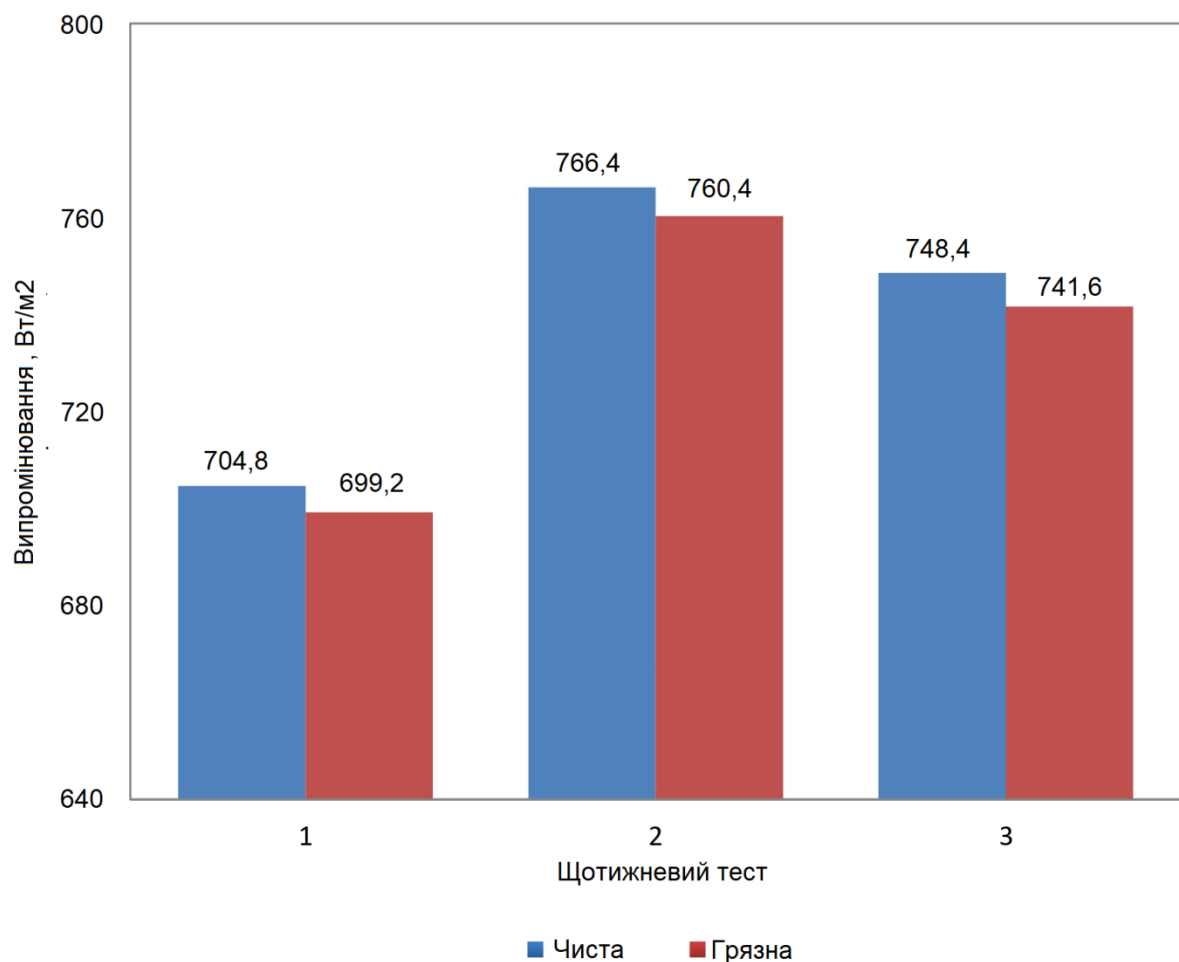


Рисунок 3.14 - Опромінення для чистих і заплених панелей під час щотижневого тесту

### 3.3.4 Підсумки щотижневих тестів вихідної потужності

На рис. 3.15 показано підсумок усіх щотижневих тестів вихідної потужності. Синя смуга вказує на вихідну потужність чистої панелі, а червона смуга - на вихідну потужність запиленої панелі. Сонячні фотоелектричні панелі були використані для вимірювання вихідної потужності чистих і заплених панелей. З результатів було виявлено, що найбільше значення вихідної потужності було отримано під час тесту 2, за яким слідували щотижневі тести 3 і 1. З іншого боку, різниця у вихідній потужності між чистою і запиленою панеллю для щотижневого тесту 1 становила 0,5 Вт, щотижневого тесту 2 - 0,6 Вт і щотижневого тесту 3 - 0,6 Вт. Загалом, середня різниця у вихідній потужності між чистою і запиленою панеллю для всіх погодинних тестів становила близько 0,57 Вт.

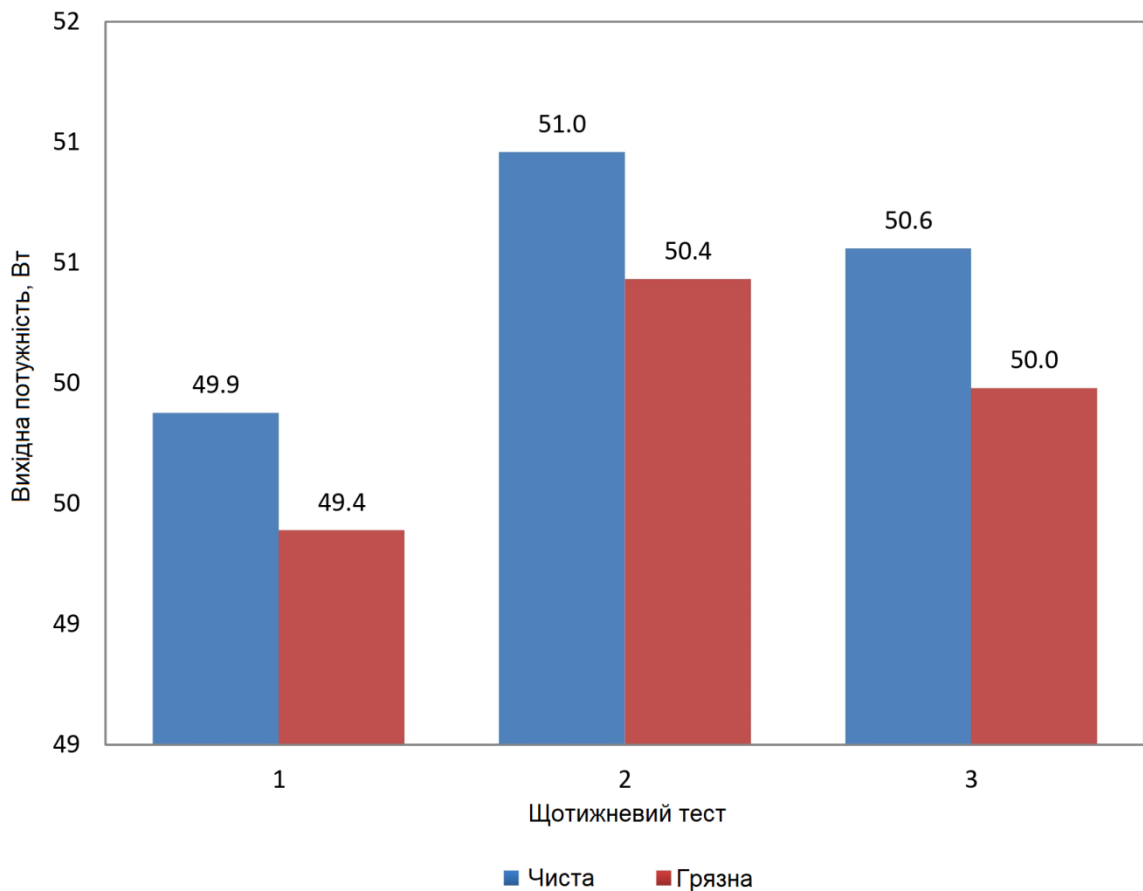


Рисунок 3.15 - Вихідна потужність для чистих і заплених панелей під час щотижневого тесту

### 3.3.5 Падіння продуктивності сонячних фотоелектричних панелей при щотижневому тестуванні

На рис. 3.16 показано падіння продуктивності для опромінення та вихідної потужності під час щотижневих тестів. Падіння продуктивності було виміряно шляхом порівняння очищених панелей з запиленими. Було помічено, що під час проведення всіх щотижневих тестів ззовні будівлі не було дощу і туману.

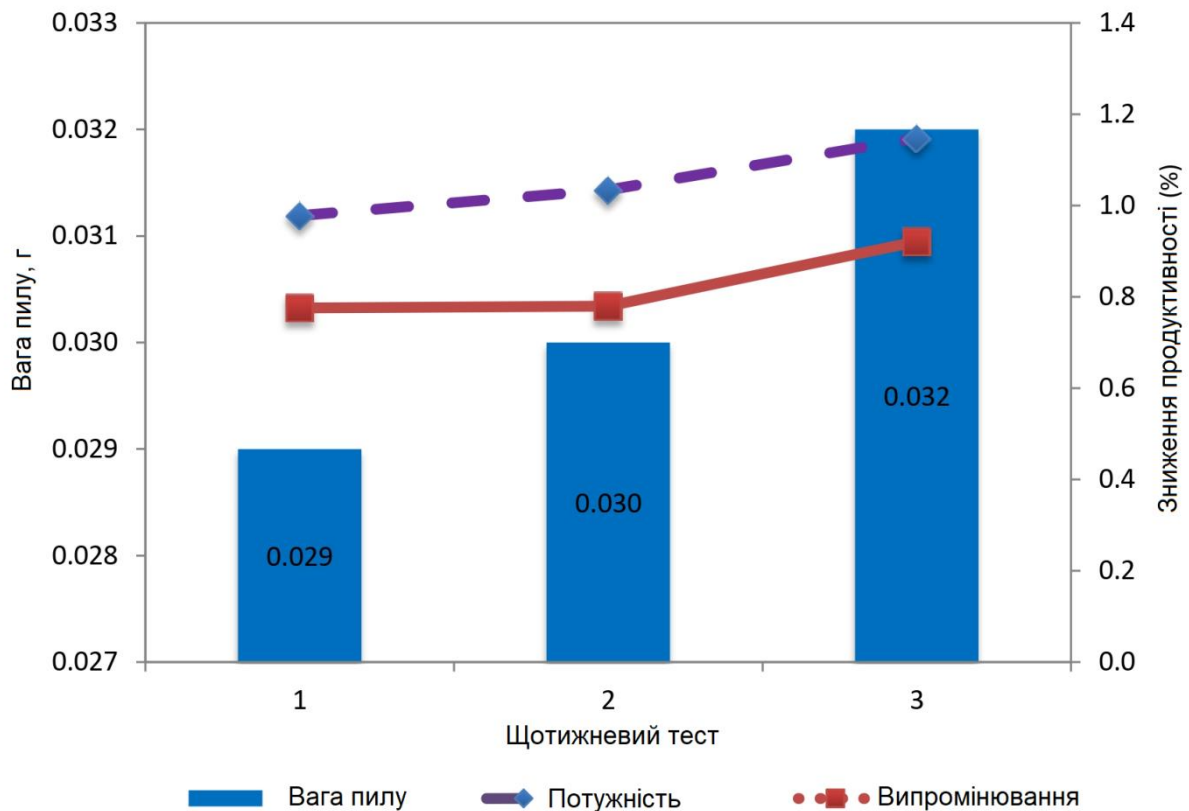


Рисунок 3.16 - Зниження продуктивності та маса пилу під час щотижневого тесту

З отриманих результатів було виявлено, що погодинний тест 3 мав найбільше падіння вихідної потужності та випромінювання, за яким слідували тижневі тести 2 і 1. Це було пов'язано з тим, що кількість пилу, накопиченого

на сонячних фотоелектричних панелях під час тижневого тесту 1, була вищою порівняно з нашими тестами 2 і 3. Чим більше пилу накопичується на сонячному колекторі, тим більше падає продуктивність системи сонячних фотоелектричних панелей. Крім того, закономірність падіння вихідної потужності та випромінювання була однаковою. Середній показник падіння вихідної потужності склав близько 1,1 %, тоді як для випромінювання - близько 0,9 %, а середня маса пилу, що накопичилася під час годинного тесту, склала близько 0,03 г на 0,01 м<sup>2</sup>.

### **3.4 Місячне випробування**

#### **3.4.1 Зміна вихідної потужності та опромінення з часом під час місячного випробування**

На рис. 3.17 показано зміну вихідної потужності і випромінювання з часом для місячного випробування 1. Місячне випробування проводилося тричі. Перший результат щомісячного тесту представлено в цьому розділі, а решта - в додатках. Щомісячний тест 1 було проведено 30 квітня 2023 року, щомісячний тест 1 - 30 травня 2023 року і щомісячний тест 1 - 30 червня 2023 року. Під час проведення всіх тестувань погода була сприятливою, оскільки в ці дні не було дощу та туману. Щомісячні випробування проводилися з 10 ранку до 6 вечора. Було дві пари панелей: скляні манекени та сонячні фотоелектричні панелі. Першу пару панелей залишали нечищеною протягом одного місяця, а другу пару панелей завжди чистили. Показання були зняті після того, як пил, що накопичився за один місяць без очищення, був видалений. Отриманий результат показав, що між чистими і запиленими панелями існує різниця у вихідній потужності та випромінюванні. Загалом, середня вихідна потужність сонячної фотоелектричної панелі становила близько 50 Вт, в той час як опромінення було близько 720 Вт/м<sup>2</sup>.

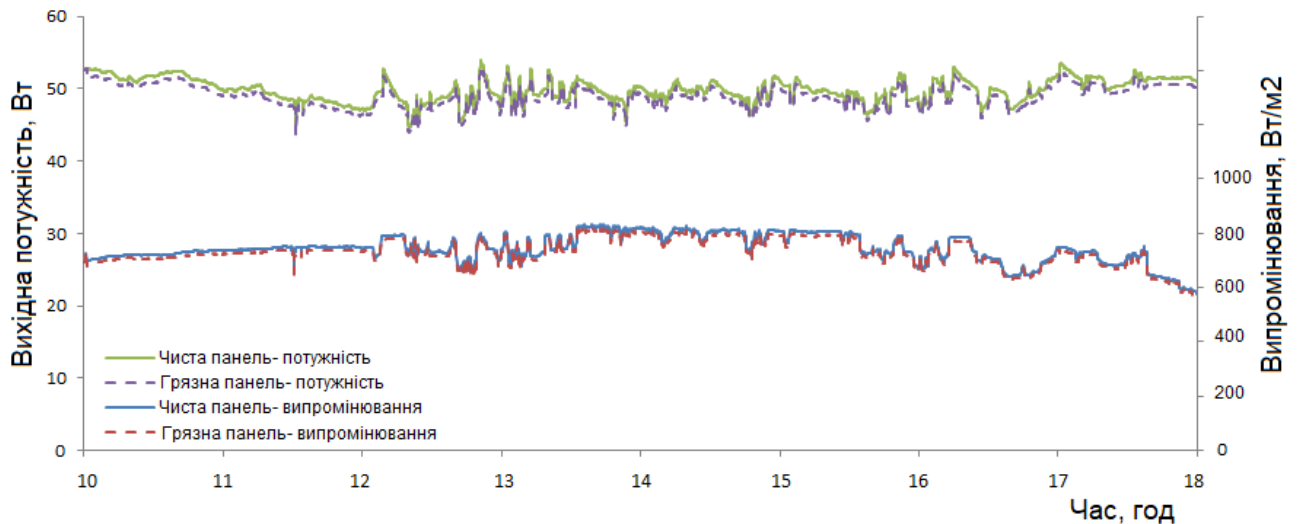


Рисунок 3.17 - Зміна вихідної потужності та опромінення з часом для щомісячного тесту 1

### 3.4.2 Зміна падіння продуктивності з часом при щомісячному тестуванні

На рис. 3.18 показано зміну падіння продуктивності з часом для щомісячного тесту 1. Результат, як на рис. 3.18, був отриманий з результату на рис. 3.17, зміни вихідної потужності та опромінення з часом. Різниця між чистими і запиленими панелями для вихідної потужності і випромінювання була представлена на Рис. 3.18. Синя лінія вказує на падіння продуктивності вихідної потужності, а червона лінія вказує на падіння продуктивності випромінювання. З отриманих результатів видно, що найбільше падіння продуктивності за вихідною потужністю та випромінюванням відбулося близько 14:00, а найменше - о 12:00. Таким чином, середнє падіння продуктивності вихідної потужності становило близько 1,1 %, тоді як середнє падіння продуктивності випромінювання становило близько 0,9 %.

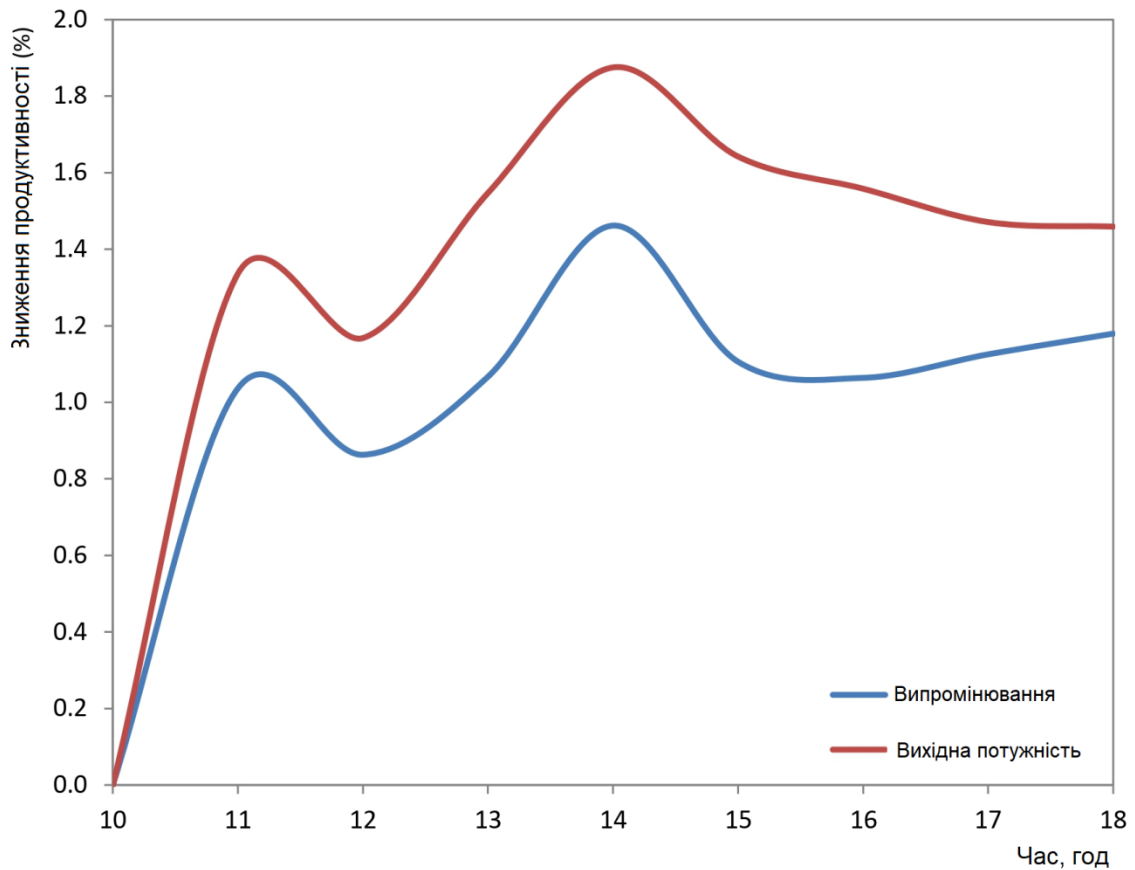


Рисунок 3.18 - Зміна падіння продуктивності з часом для щомісячного тесту

### 3.4.3 Підсумки щомісячних тестів на опромінення

На рис. 3.19 показано підсумок усіх щомісячних тестів опромінення. Синя смужка вказує на випромінювання від чистої панелі, а червона смужка вказує на випромінювання від запиленої панелі. Скляні манекени були використані для того, щоб надати дані про випромінювання сонячного світла під скляними панелями в динаміці. Було помічено, що під час проведення щотижневих тестів погода була сприятливою для кожного годинного тесту, оскільки на вулиці не було дощу і туману. В результаті було виявлено, що щотижневий тест 1 мав найвище значення випромінювання порівняно з щомісячними тестами 2 і 3. З іншого боку, різниця у значенні випромінювання для чистої і запиленої панелі для щомісячних тестів 1, 2 і 3 становила  $9,2 \text{ Вт/м}^2$ ,  $8,8 \text{ Вт/м}^2$  і  $7,6 \text{ Вт/м}^2$ . Таким чином, середня різниця у значенні випромінювання для чистої та запиленої панелі для всіх погодинних тестів становила  $8,52 \text{ Вт/м}^2$ .

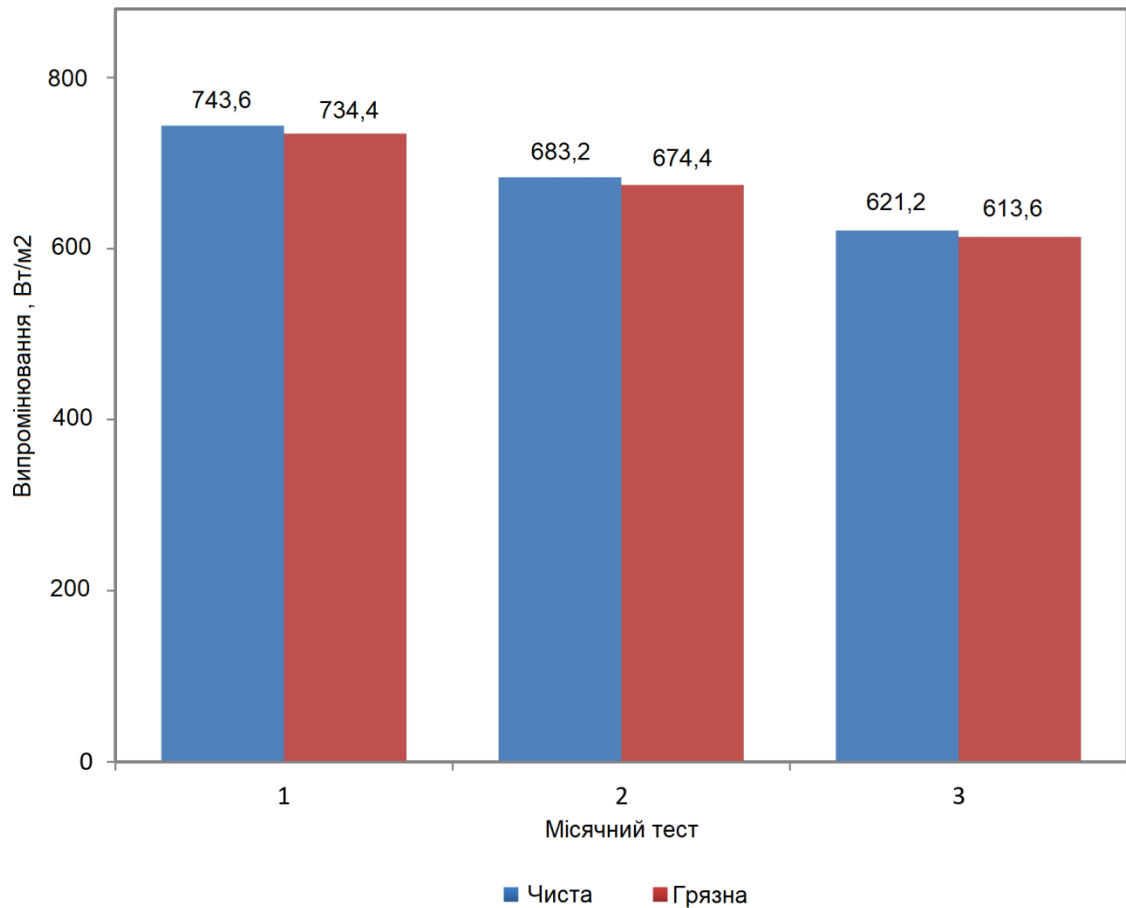


Рисунок 3.19 - Випромінювання для чистої та запиленої панелі під час щомісячного тесту

### 3.4.4 Підсумки щомісячних тестів вихідної потужності

На рис. 3.20 показано підсумок усіх щомісячних тестів вихідної потужності. Синя смуга вказує на вихідну потужність чистої панелі, а червона смуга - на вихідну потужність запиленої панелі. Сонячні фотоелектричні панелі були використані для вимірювання вихідної потужності чистих і запилених панелей. За результатами було виявлено, що щомісячний тест 1 мав найвище значення вихідної потужності, за яким слідували щомісячні тести 3 і 2. З іншого боку, різниця між чистими і запиленими панелями для щомісячного тесту 1 становила 0,7 Вт, щомісячного тесту 2 - 0,8 Вт і щомісячного тесту 3 - 0,8 Вт. Загалом, середня різниця у вихідній потужності для чистих і запилених панелей для всіх щомісячних тестів становила 0,77 Вт.

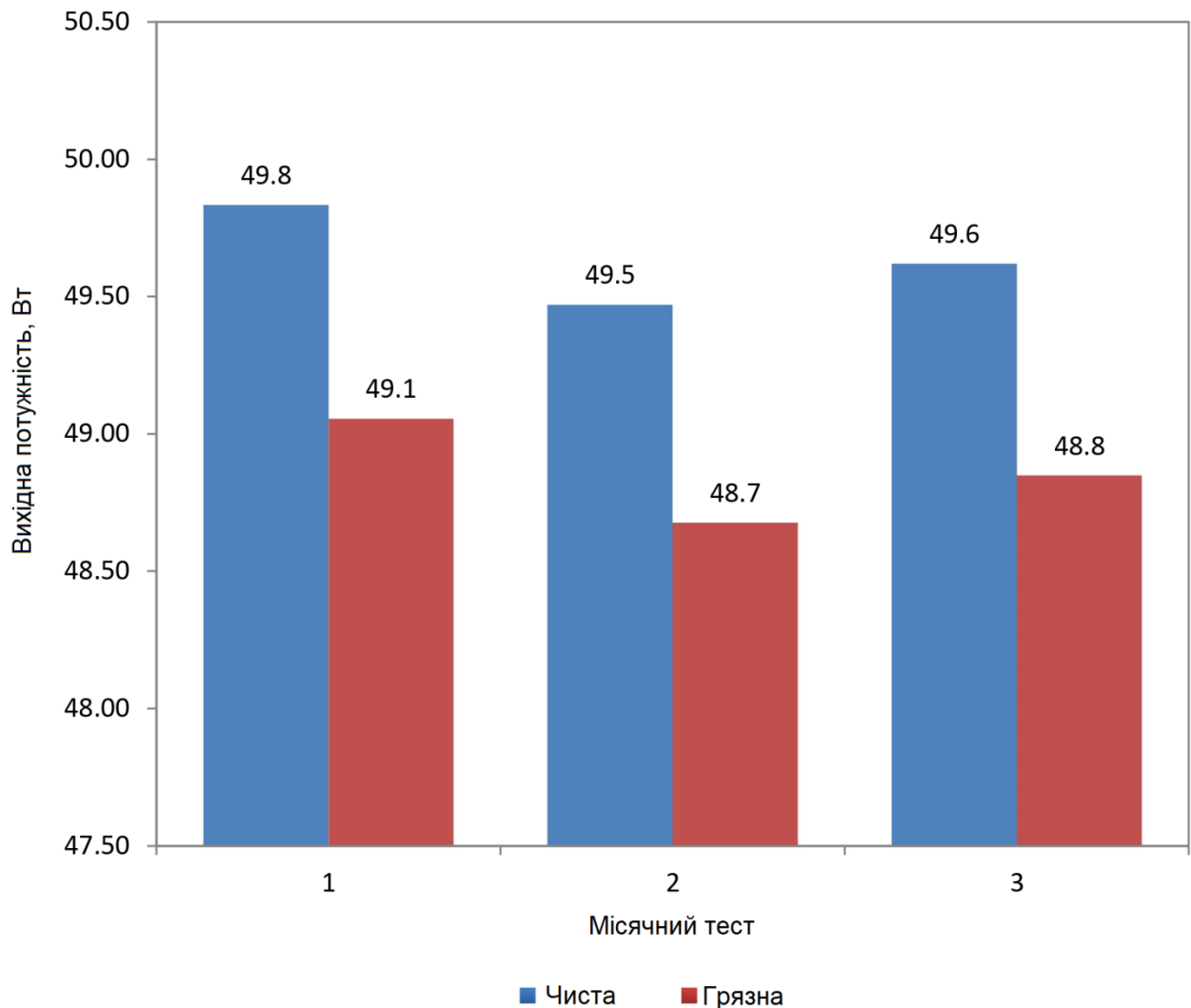


Рисунок 3.20 - Вихідна потужність для чистих і запилених панелей для щомісячного тесту

### 3.4.5 Падіння продуктивності сонячних фотоелектричних панелей під час щомісячного тестування

На рис. 3.21 показано падіння продуктивності для опромінення та вихідної потужності під час щомісячних тестів. Падіння продуктивності було виміряно шляхом порівняння очищених панелей з запиленими панелями. Було відмічено, що під час проведення всіх годинних тестів ззовні будівлі не було дощу та туману. З отриманих результатів було виявлено, що щомісячний тест 2



мав найбільше падіння продуктивності вихідної потужності та випромінювання, за яким слідували погодинні тести 1 і 3. Це було пов'язано з тим, що кількість пилу, накопиченого на сонячних фотоелектричних панелях під час щомісячного тесту 2, була вищою порівняно з нашими тестами 1 і 3. Чим більше пилу накопичується на сонячному колекторі, тим більше падає продуктивність системи сонячних фотоелектричних панелей. З отриманих результатів, середнє падіння продуктивності за вихідною потужністю склало близько 1,5 %, тоді як за опроміненням - близько 1,2 %. З іншого боку, середня маса пилу, накопиченого за час щомісячного тестування, становила близько 0,038 г на 0,01 м<sup>2</sup>.

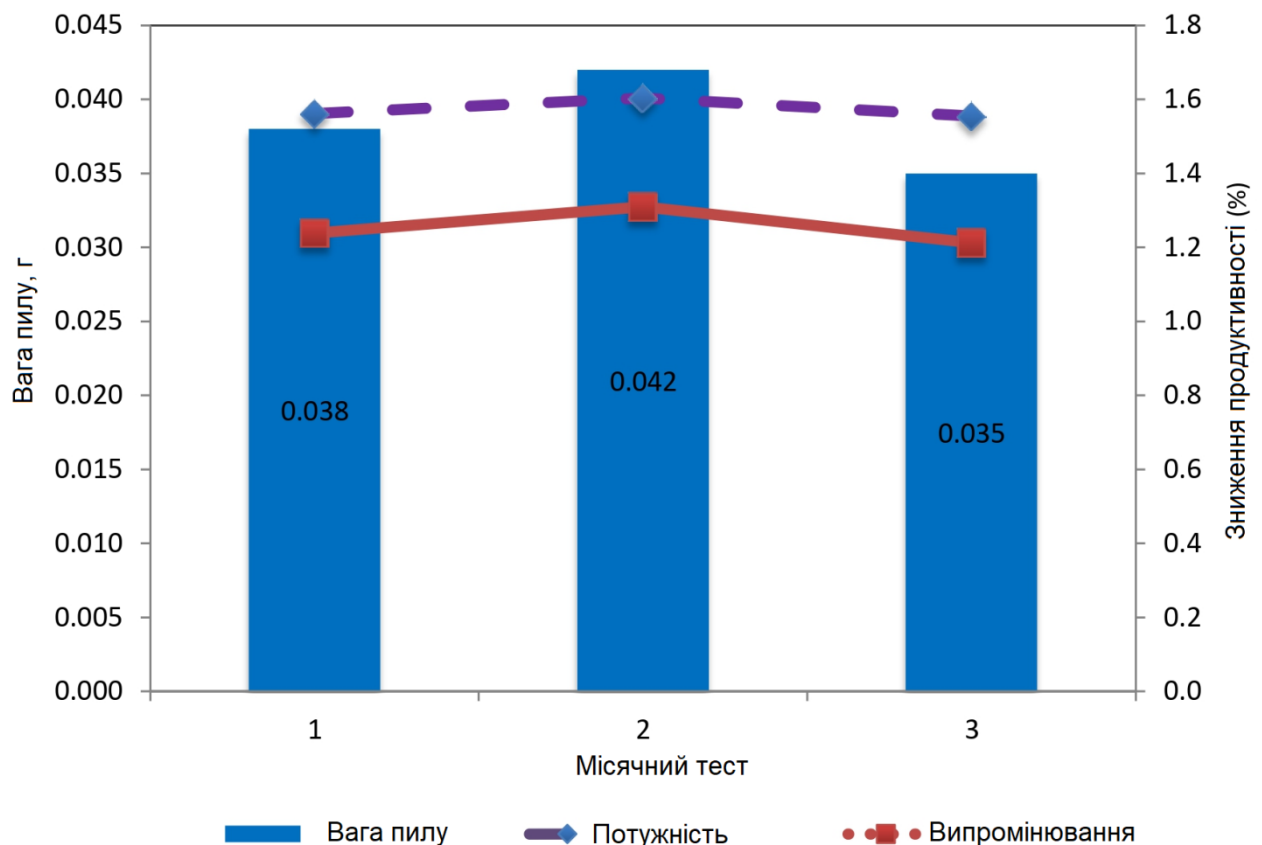


Рисунок 3.21 - Зниження продуктивності та маса пилу під час щомісячного тесту

### 3.5 Безперервне 3-місячне випробування

#### 3.5.1 Зміна вихідної потужності та опромінення з часом під час 3-місячного випробування

На рис. 3.22 показано зміну вихідної потужності та випромінювання впродовж 3 місяців безперервної роботи. Випробування було проведено 1 липня 2023 року. Було помічено, що під час проведення всіх випробувань погода була гарною, оскільки не було дощу і туману протягом дня. Випробування проводилися з 10 ранку до 6 вечора. Було використано дві пари панелей: скляні манекени та сонячні фотоелектричні панелі. Першу пару панелей залишали нечищеною протягом 3 місяців, а другу пару панелей завжди чистили. Показники були зняті після того, як пил, що накопичився за 3 місяці, не очищався. З отриманих результатів видно, що між чистими і запиленими панелями існує велика різниця у вихідній потужності та випромінюванні. Загалом, середнє значення випромінювання для чистої панелі становило близько  $700 \text{ Вт/м}^2$ , а для запиленої панелі - близько  $680 \text{ Вт/м}^2$ .

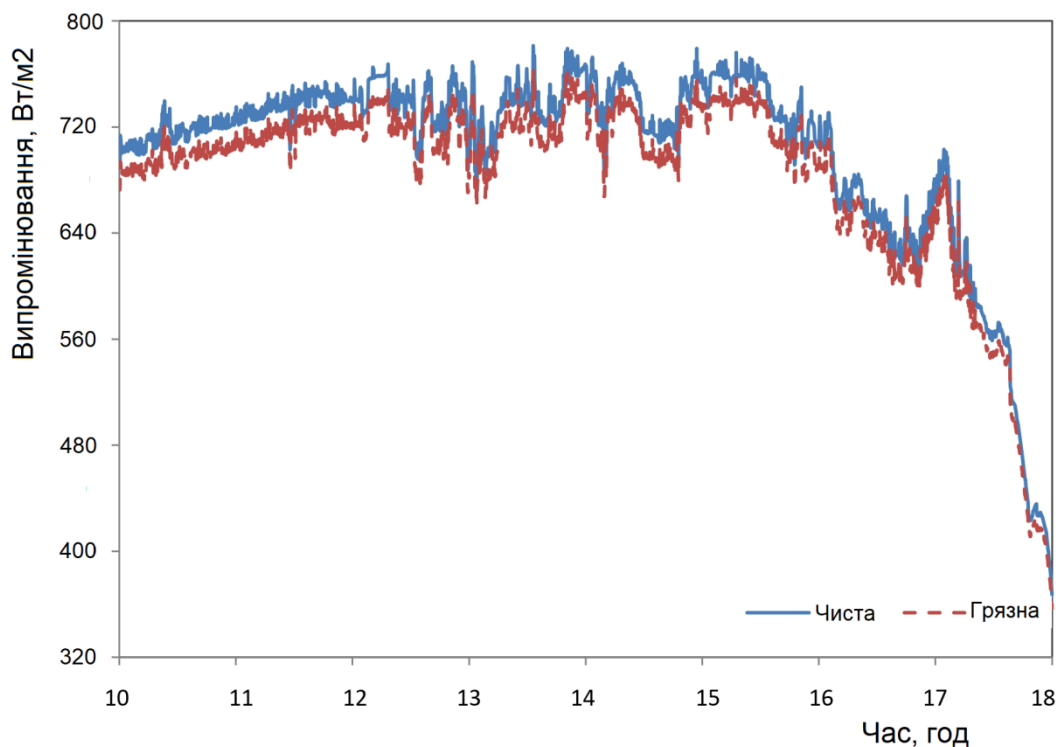


Рисунок 3.22 - Зміна вихідної потужності та випромінювання з часом протягом 3 місяців

### 3.5.2 Зміна падіння продуктивності з часом при щомісячному тестуванні

На рис. 3.23 показано зміну падіння продуктивності з часом для 3-місячного тесту. Результат, показаний на рис. 3.23, був отриманий з результату на рис. 3.24, різниця між чистими і запиленими панелями для опромінення представлена на рис. 3.8. Синя лінія вказує на падіння продуктивності при опроміненні. З отриманого результату видно, що існує 3 пікових значення падіння продуктивності, які припадають на період 12:00, 15:00 та 17:00. Крім того, було два найнижчих значення випромінювання о 14:00 та 16:00. Крім того, середнє значення пікового падіння продуктивності становило близько 2,6 %, а середнє найнижче падіння продуктивності - близько 2,4 %. Таким чином, середнє падіння продуктивності опромінення для безперервного 3-місячного тесту становило близько 2,4 %.

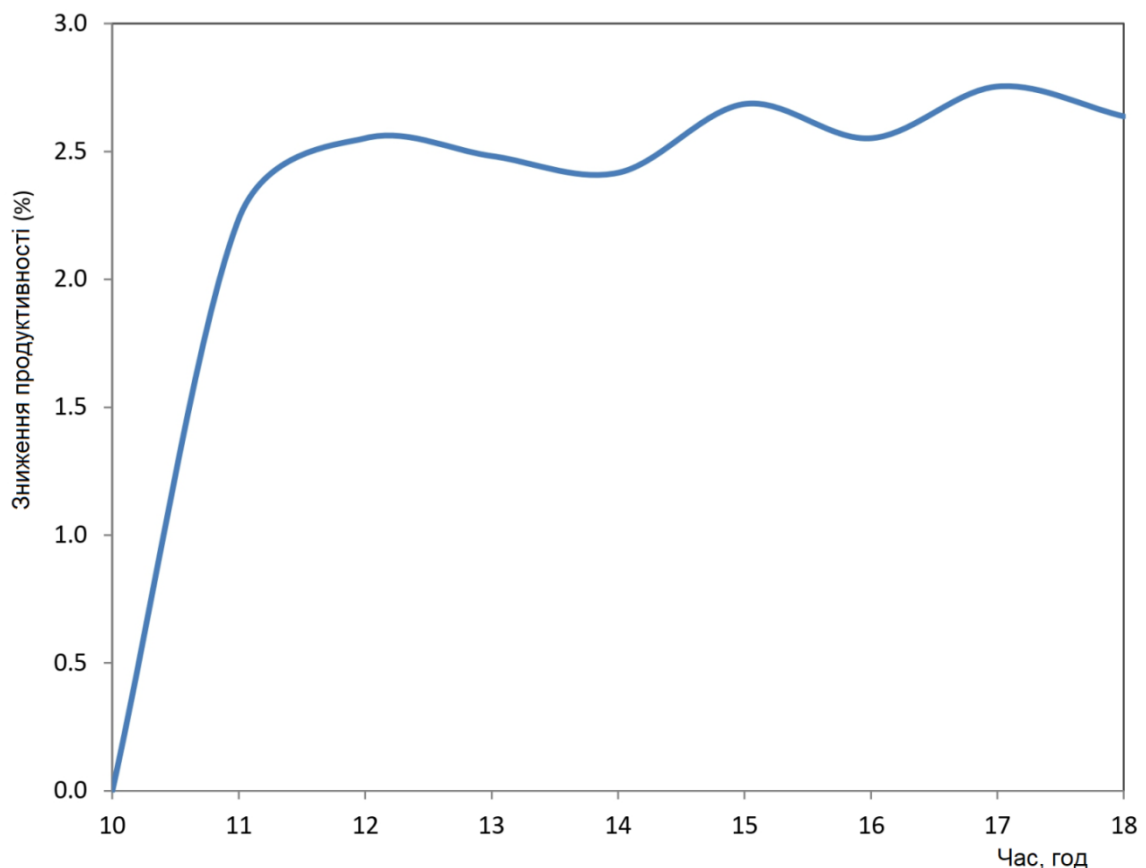


Рисунок 3.23 - Зміна падіння продуктивності з часом під час безперервного 3-місячного тесту

### 3.6 Підсумки для всіх тестів

#### 3.6.1 Падіння продуктивності вихідної потужності

На рис. 3.24 показано падіння продуктивності вихідної потужності за результатами різних тестів. Було проведено п'ять різних тестів: погодинний, щоденний, щотижневий, щомісячний і безперервний 3-місячний тест.

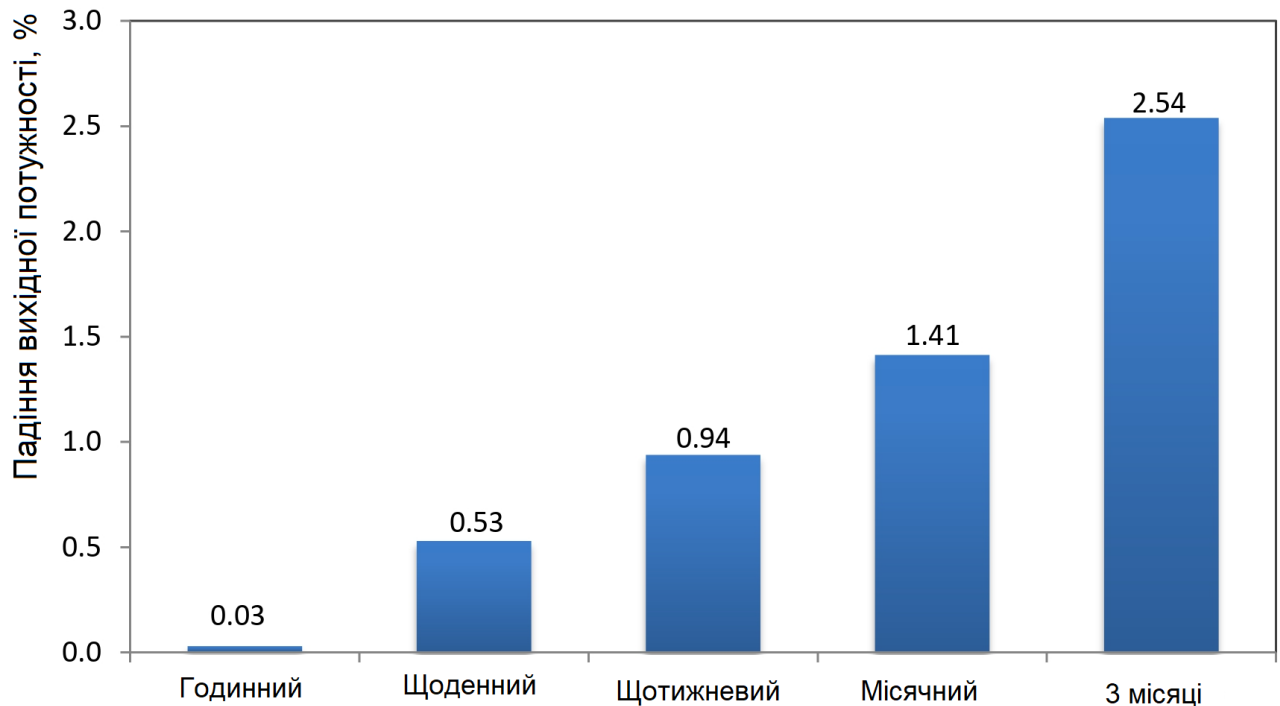


Рисунок 3.24 - Показники падіння вихідної потужності для всіх тестів

Всі тести проводились за однаковими процедурами, проте кожен тест очищався через різний проміжок часу. Погодинний тест очищався щогодини, так само як і щоденні, щотижневі, щомісячні та 3-місячні тести. З отриманих результатів видно, що падіння продуктивності вихідної потужності збільшилося від погодинного до 3-місячного тесту. Це було пов'язано зі збільшенням інтервалу часу для очищення. Погодинний тест показує менше падіння вихідної потужності, яке становить 0,03 %, порівняно з 3-місячним тестом, який становить 2,54 %. З результатів видно, що приріст падіння вихідної потужності від погодинного до щоденного тесту становить 0,5 %, від щоденного до тижневого тесту - 0,41 %, від тижневого до місячного тесту - 0,47 % і від місячного до безперервного 3-місячного тесту - 1,13 %. Таким чином,

середнє падіння вихідної потужності становить близько 0,46 % від погодинного до місячного тесту.

### 3.6.2 Середня маса накопичення пилу

На рис. 3.25 показано середню масу пилу, що накопичився за результатами різних тестів: погодинного, щоденного, щотижневого, щомісячного та безперервного 3-місячного тесту. Кожен тест проводився тричі, щоб отримати загальне середнє значення пилу, накопиченого на сонячному фотоелектричному колекторі.

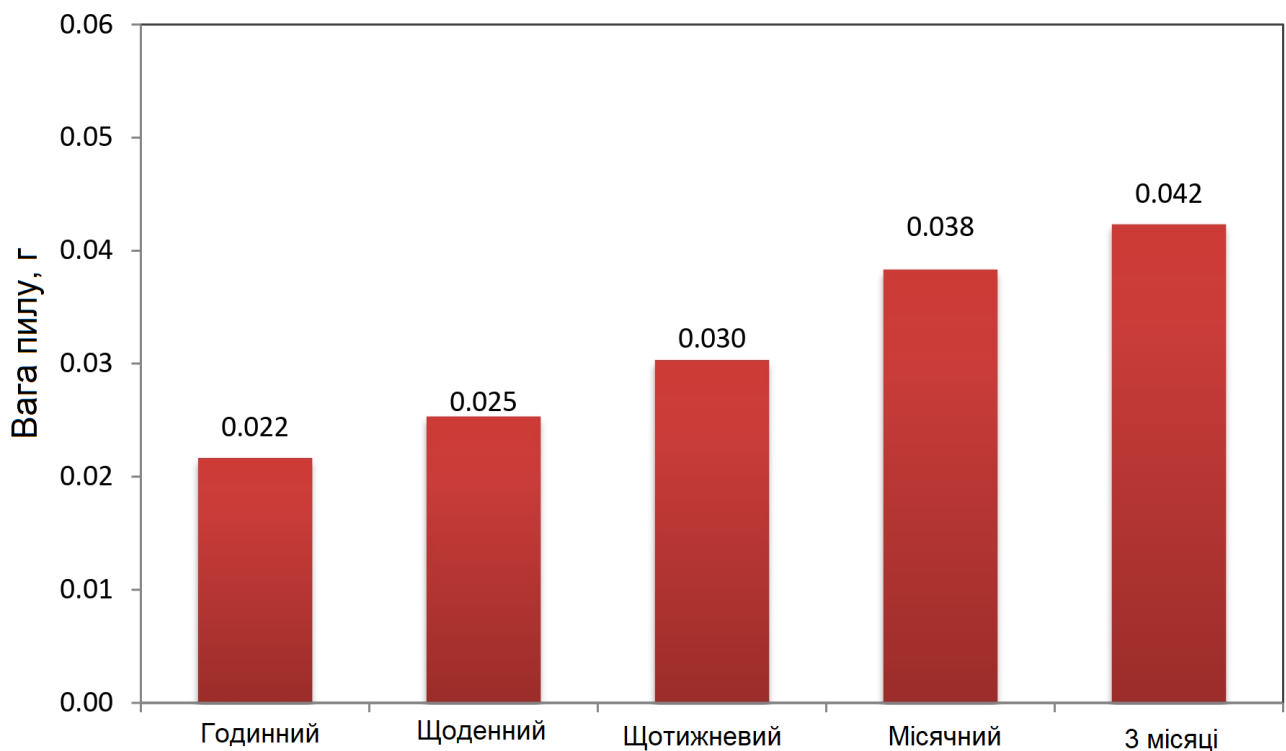


Рисунок 3.25 - Середня маса пилу для всіх тестів

Зазвичай для збору та вимірювання маси пилу, що накопичується на сонячному колекторі, використовувалися дві панелі розміром  $0,01 \text{ м}^2$ . Перша панель була чистою, а друга - запиленою. Різниця в масі між двома панелями вказує на масу пилу, що накопичився на панелі. З отриманого результату видно, що середня маса накопичення пилу на панелях зростає від погодинного до 3-місячного тесту. Це пов'язано з різним інтервалом часу прибирання.

Погодинний тест показує, що на панелі накопичується менша маса пилу, яка становить 0,03 %, порівняно з 3-місячним тестом, який становить 0,042 %. Було зафіксовано, що приріст маси пилу від погодинного до щоденного тесту становить  $0,003 \text{ г/м}^2$ , від щоденного до тижневого тесту -  $0,005 \text{ г/м}^2$ , від тижневого до місячного -  $0,008 \text{ г/м}^2$ , а від місячного до безперервного 3-місячного тесту -  $0,004 \text{ г/м}^2$ . Таким чином, середнє падіння вихідної потужності становить близько 0,005 % від щогодинного до щомісячного тесту.

### 3.7 Прогнозоване падіння продуктивності через рік

На рис. 3.26 показано прогноз падіння продуктивності для безперервного 3-місячного тесту.

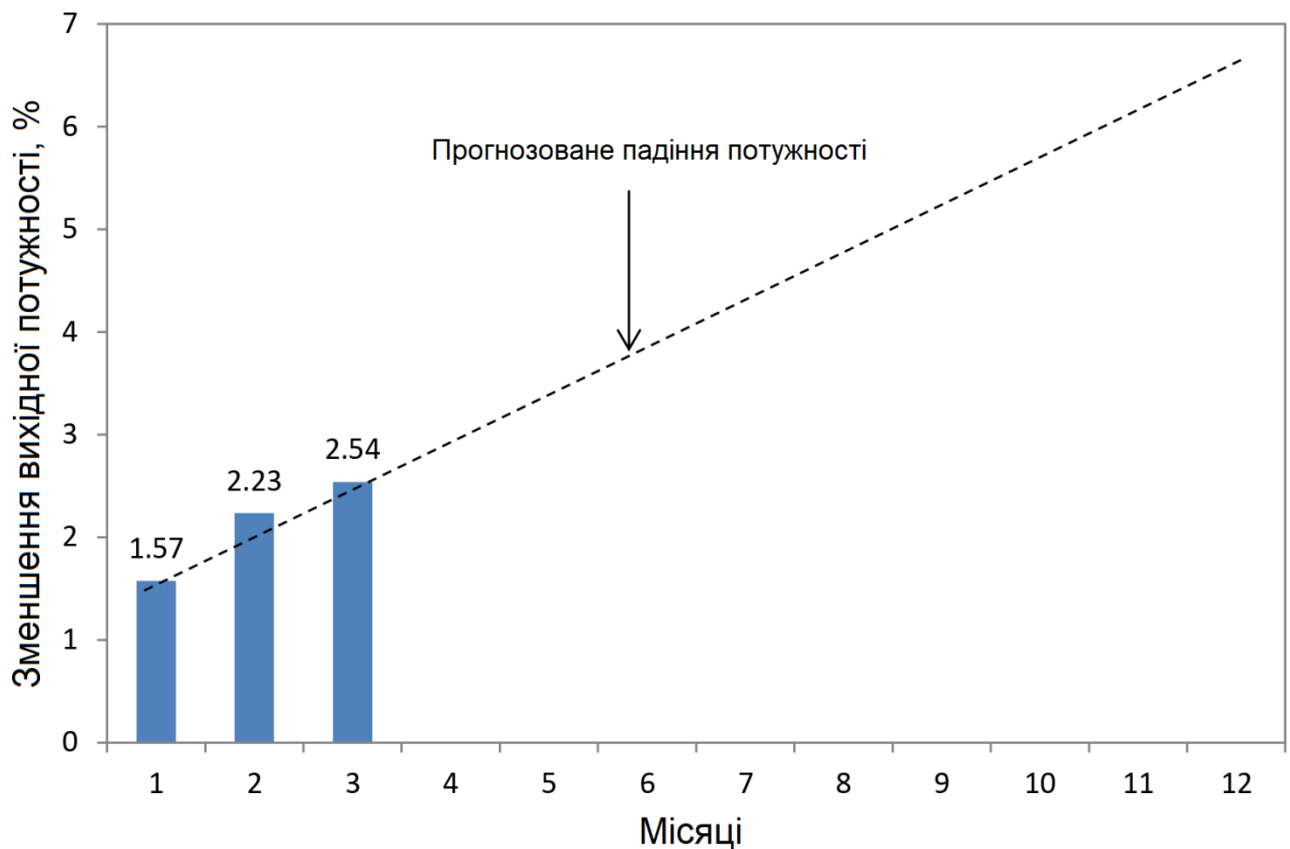


Рисунок 3.26 - Прогнозування падіння продуктивності виробництва електроенергії

Перше щомісячне технічне обслуговування показало, що панелі були чистими кожного місяця. В той час як друге щомісячне обслуговування

показало, що панелі чистили кожні 2 місяці, і те ж саме відбувалося протягом наступних місяців. З отриманого результату видно, що падіння продуктивності при безперервному 3-місячному тестуванні лінійно зростає. Таким чином, лінійна екстраполяція була зроблена на графіку для прогнозування падіння продуктивності на наступний місяць. Цей прогноз було використано для визначення частоти технічного обслуговування як для промислового, так і для житлового секторів шляхом розрахунку приросту прибутку для промислового та житлового секторів. Прогнозування падіння вихідної потужності було використано для визначення загальних збитків, понесених через падіння сонячної енергії, що генерується системою сонячних фотоелектричних панелей.

### **3.8 Висновки до розділу**

1. Представлені результати дослідження продуктивності сонячних фотоелектричних панелей в залежності від часу експлуатації та забрудненості поверхні. Показано результати в послідовності, починаючи з погодинного і закінчуючи безперервним 3-місячним тестом. Для того, щоб переконатися в узгодженості результатів, було проведено три вимірювання для кожного тесту. Усереднені значення наведені у роботі.

2. Результати досліджень представлено на графіках. Для аналізу бралися до уваги наступні дані: зміна вихідної потужності і випромінювання з часом, зміна падіння продуктивності з часом і розподіл маси пилу з часом.

3. На основі отриманих результатів, проведено узагальнення всіх тестів (погодинних, щоденних, місячних і 3 місячних) і представлено їх на одному графіку в для того, щоб проаналізувати і зробити порівняння для всіх тестів.

4. Проведено аналіз отриманих результатів і виконано прогноз падіння продуктивності виробництва електроенергії на рік.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Причини електротравм, напруга кроку

Як і при інших видах травм, при електротравмах виділяють технічні, організаційно-технічні, організаційні і організаційно-соціальні їх причини [14].

До технічних причин належать: недосконалість конструкції електроустановки і засобів захисту, допущені недоліки при виготовленні, монтажі і ремонті електроустановки.

До основних організаційних причин електротравм належать:

- відсутність (непризначення наказом) на підприємстві особи, відповідальної за електрогосподарство або невідповідність кваліфікації цієї особи чинним вимогам;
- недостатня укомплектованість електротехнічної служби працівниками відповідної кваліфікації;
- відсутність на підприємстві посадових інструкцій для електротехнічного персоналу та інструкцій із безпечного обслуговування та експлуатації електроустановок;
- недостатня підготовленість персоналу з питань електробезпеки, несвоєчасна перевірка знань, невідповідність групи з електробезпеки персоналу характеру робіт, що виконуються;
- недотримання вимог щодо безпечного виконання робіт в електроустановках за нарядами-допусками, розпорядженнями та в порядку поточної експлуатації;
- неефективний нагляд, відомчий і громадський контроль за дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт в електроустановках та їх експлуатації.

До основних організаційно-соціальних причин електротравм належать: змушене виконання не за спеціальністю електробезпечних робіт; негативне



ставлення до виконуваної роботи, обумовлене соціальними чинниками; залучення працівників до понадурочних робіт; порушення виробничої дисципліни; залучення до роботи осіб віком до 18 років.

При переміщенні людини в зоні розтікання струму в землі її ноги будуть торкатися ділянок землі з різними потенціалами, а на людину буде діяти напруга, яка визначається різницею цих потенціалів і відома під назвою *напруга кроку* - різниця потенціалів між двома точками на поверхні землі в зоні розтікання струму, які знаходяться на відстані кроку (0,8 м) одна від одної. З наближенням до місця замикання на землю величина напруги кроку буде зростати, і вона може досягти небезпечних для людини значень вже при напрузі електроустановок 0.4 кВ, а в сиру погоду та за зволоженого ґрунту і при меншій напрузі. Тому Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів при наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в приміщенні без застосування засобів захисту - діелектричні боти, галоші, суха дошка, сухе гумове взуття тощо.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі "нога-нога", або різкого збільшення опору в цій петлі за рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечних напруг кроку для надання допомоги потерпілим і т.ін. і відсутності під рукою засобів захисту, доцільно переміщуватися в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкались одна другої.

## **4.2 Фізичні основи електробезпеки**

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей

електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [14].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, струмопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому

навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтно-профілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

#### **4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час**

На основі всебічного аналізу факторів, що впливають на стійкість роботи об'єктів енергетики, робляться висновки про ймовірність виникнення аварій, стихійних лих, терористичних актів та їх впливу на виробничу діяльність і визначаються основні напрямки (шляхи) підвищення стійкості функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу [15]:

1. Забезпечення надійного захисту робітників та службовців від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих і засобів ураження
2. Захист основних виробничих фондів від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих та засобів ураження, в тому числі і від вторинних вражаючих факторів;
3. Забезпечення стабільності і безперервності управління виробництвом та ЦЗ;
4. Забезпечення надійності постачання об'єкта енергоносіями.

Для надійного функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях завчасно організовуються і проводяться заходи, спрямовані на підвищення стійкості їх роботи. До них відносяться:

1. Інженерно-технічні заходи (ІТЗ).
2. Технологічні заходи.
3. Організаційні заходи.

Інженерно-технічні заходи - заходи, спрямовані на забезпечення підвищення стійкості будівель, споруд, обладнання, енергетичних систем до впливу НС.

Технологічні заходи - заходи, спрямовані на здійснення підвищення стійкості шляхом зміни технологічного режиму, що виключає виникнення вторинних факторів ураження.

Організаційні заходи - заходи, спрямовані на завчасну розробку і планування дій керівного складу, особового складу, штабу ЦЗ, служб, невоєнізованих формувань об'єктів енергетики в умовах надзвичайних ситуацій.

Основними напрямками підвищення стійкості функціонування є наступне:

- забезпечення захисту населення і його життєдіяльності;
- раціональне розміщення виробничих сил та потужностей на території об'єкта енергетики, регіону;
- підготовка до роботи в умовах НС мирного та воєнного часу;
- підготовка до виконання робіт по відновленню об'єктів в умовах НС;
- підготовка системи управління.

Всі ці заходи повинні забезпечити максимально можливе зниження втрат і руйнувань та зменшити можливість виникнення повторних зон зараження при впливі РР, ОР та НХР. Зміст таких заходів, виходячи з галузевих і інших нормативних документів, конкретизується для кожної територіальної ланки..

Ми знаємо, що електропостачання є основою всякого виробництва. Для забезпечення надійного електропостачання в НС при його проектуванні та будівництві повинні бути враховані наступні основні вимоги, що впливають із завдань цивільного захисту:

1. Електропостачання повинно здійснюватися від енергосистем, до складу яких входять електростанції, що працюють на різних видах палива.
2. Великі електростанції слід розміщувати одну від одної і від великих міст на значних відстанях.

3. Районні понижуючі підстанції, диспетчерські пункти енергосистем та лінії електропередач необхідно розміщувати розсереджено і надійно захищати.

4. Постачання електроенергією великих міст слід передбачати від двох незалежних джерел.

Крім того, необхідно створювати автономні резервні джерела електропостачання. Для цього можна використовувати рухливі електростанції на залізничних платформах, малопотужні електростанції, не включені до енергосистеми. Система електропостачання повинна мати грозозахисту систему та захист від впливу електромагнітного імпульсу ядерного вибуху.

Енергетичні споруди та електричні мережі повинні проектуватися з урахуванням забезпечення стійкого електропостачання категорійних міст і об'єктів. Схема електричних мереж енергосистем при необхідності повинна передбачати можливість автоматичного розподілу енергосистеми на збалансовані, незалежно працюючі частини. При проектуванні енергетичних систем і їхнього об'єднання теплові (конденсаційні) електростанції слід розміщати поза зонами можливого катастрофічного затоплення. У категорійних містах припускається розміщення тільки теплоелектроцентралей незалежно від їхньої встановленої потужності з максимальним віддаленням їх від центрів житлової і промислової забудов. Нові атомні електростанції та атомні теплоелектроцентралі повинні розміщатися з урахуванням їх впливу на навколишнє середовище і радіаційну безпеку населення. На існуючих та на тих, що проектуються і будуються атомних станціях, передбачається створення систем автоматизованого контролю за радіаційною обстановкою на території станції і в зоні спостереження цих станцій, оповіщення та інформаційного забезпечення обслуговуючого персоналу і населення про радіаційну небезпеку, а також захищених пунктів керування протиаварійними діями на території станції і в пристанційних селищах.

При проектуванні схем зовнішнього електропостачання категорійних міст необхідно передбачати їхнє електропостачання від декількох незалежних та

територіально рознесених джерел живлення (електростанції і підстанції), частина з яких повинна розташовуватися за межами зон можливих руйнувань. При цьому зазначені джерела і їхні лінії електропередачі повинні, як правило, знаходитися на відстані одне від одного, що виключає можливість їхнього одночасного виходу з ладу. Системи електропостачання категорійних міст повинні враховувати можливість забезпечення транзиту електроенергії в обхід зруйнованих об'єктів за рахунок спорудження коротких перемичок повітряними лініями електропередачі. Нові лінії електропередачі, що живлять особливо важливих споживачів, слід проектувати в кабельному виконанні. Для забезпечення можливості зниження електричного навантаження в категорійних містах системи електропостачання об'єктів, які не відключаються у воєнний час, повинні бути відділені від систем електропостачання інших об'єктів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сонячна енергія для виробництва електроенергії за допомогою фотоелектричних панелей є вигідною, оскільки вона не забруднює навколишнє середовище, є екологічно чистою і не вимагає значних витрат на обслуговування. Однак, накопичення пилу на сонячних фотоелектричних панелях з природних причин може знизити продуктивність сонячної фотоелектричної системи. Дослідження, проведені в різних країнах, показали, що накопичений пил на фотоелектричних панелях може знизити продуктивність сонячної електростанції.

2. Зменшення падіння вихідної потужності сонячної фотоелектричної панелі під час погодинного тесту склало близько 0,031 %, щоденного тесту - близько 0,53 %, щотижневого тесту - близько 0,94 %, щомісячного тесту - близько 1,41 %, а падіння вихідної потужності під час безперервного 3-місячного тесту склало близько 2,54 %.

3. Було підраховано, що падіння продуктивності системи сонячних фотоелектричних панелей за рік склало близько 6 %. Таким чином, зібравши дані про прогнозоване падіння продуктивності, можна визначити періодичність технічного обслуговування, щоб визначити найкращий час для очищення панелей для промислового та приватного сектору.

4. Для промислових підприємств, що виробляють 100 МВт\*год/день, рекомендований інтервал часу для чищення панелей становить 2 місяці з метою максимізації прибутку, в той час як для приватного сектору, що виробляє 20 кВт\*год/день, рекомендується проводити технічне обслуговування кожний місяць з метою отримання оптимального прибутку від продажу сонячної енергії.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Коваль А. В. Шляхи підвищення енергоефективності фотоелектричних систем // Д. П. Драпалюк; А. В. Коваль; В. О. Ковальчук; М. В. Королевич / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 165.
2. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10.
3. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.
4. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
5. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.
6. Sayigh, A., Al-Jandal, S., Ahmed, H. (1985). “Dust effect on solar flat surfaces devices in Kuwait.” *Energy Sources and Materials Science for Energy*, 2–20, p. 353-367.
7. Kazem, H.A, Khatib, T., Sopian, K., Buttinger, F., Elmenreich, W. & Albusaidi, A.S. (2013). “Effect of Dust Deposition on the Performance of Multi-Crystalline Photovoltaic Modules Based on Experimental Measurements.” *International Journal of renewable Energy Vol.3, No.4, 2013.*



8. El-Shobokshy, M. S., Hussein, F. M. (1993). "Effect of the dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells." *Solar Energy*, 51(6), 505–11.

9. Khatib T. A. & Sopian M.K., (2012). " On The Monthly Optimum Tilt Angle of Solar Panel for Five Sited in Malaysia." *International Journal of Power Engineering and Optimization Conference*, Melaka Malaysia: 6-7

10. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.

11. Orobchuk, B., & Koval, V. (2020). Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 99(3), 124-132.

12. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. *The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAР 2023)*.

13. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. *The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023)*. Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

14. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.

15. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022. – 150 с.