

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Піц Ернест Орестович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.383.51:681.5:621.317.3
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розробка інформаційно-вимірювальної системи моніторингу ефективності
фотоелектричних панелей для фотоелектричних станцій

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів
інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ Е. О. Піц
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Миндюк Валентин Дмитрович, канд. техн. наук, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ В.С. Цих
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

інформаційно-вимірювальних

технологій та енергетичного

менеджменту

В.С. Цих

«___» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Піцу Ернесту Орестовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка інформаційно-вимірювальної системи моніторингу ефективності фотоелектричних панелей для фотоелектричних станцій

керівник роботи Миндюк Валентин Дмитрович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом закладу вищої освіти від “05” травня 2026 року №204/7

2. Строк подання студентом роботи 15.06.2026

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз конструкції та характеристик фотоелектричних модулів.

2. Дослідження методів аналізу вольт-амперних характеристик.

3. Розробка експериментальної установки та методики вимірювань.

4. Проведення експериментальних досліджень та побудова ВАХ.

5. Оцінювання похибок вимірювань та аналіз отриманих результатів.

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А. В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В. Д.</i>		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	05.05.2026	
2	Розроблення 1 розділу: «Теоретичні основи роботи фотоелектричних панелей та аналіз методів оцінювання їх ефективності»	15.05.2026	
3	Розроблення 2 розділу: «Теоретичні основи аналізу вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей»	25.05.2026	
4	Розроблення 3 розділу: «Експериментальне дослідження та аналіз вольт-амперної характеристики фотоелектричного модуля»	14.06.2026	
5	Оформлення роботи.	15.06.2026	

Студент

(підпис)

Піц Е. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Миндюк В. Д.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Піщ Е. О. «Розробка інформаційно-вимірювальної системи моніторингу ефективності фотоелектричних панелей для фотоелектричних станцій». Бакалаврська робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2026.

Бакалаврська робота присвячена дослідженню вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів та розробці інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу їх ефективності. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 84 сторінки, 26 рисунків, 8 таблиць. Кількість використаних джерел – 23 найменування.

У роботі розглянуто принцип роботи фотоелектричних модулів, їх конструктивні особливості та основні електричні характеристики; проаналізовано вольт-амперні характеристики фотоелектричних модулів; розглянуто методи визначення точки максимальної потужності за результатами аналізу ВАХ.

Розроблено інформаційно-вимірювальну систему на базі мікроконтролера Arduino Uno R3 для дослідження характеристик фотоелектричного модуля JKM425N-54HL4R. До складу системи входять датчик напруги з резистивним подільником, датчик струму ACS758, датчик температури DS18B20, цифровий датчик освітленості BH1750, LCD-дисплей, модуль microSD для збереження результатів та реостатне навантаження для зміни робочої точки модуля. Система забезпечує автоматичне зчитування параметрів, запис результатів вимірювань, визначення середнього значення струму, розрахунок потужності та пошук точки максимальної потужності.

Проведено вимірювання параметрів фотоелектричного модуля при різних рівнях сонячного випромінювання. Для кожного значення напруги виконувалася

серія з десяти вимірювань струму з інтервалом 1 с, а також фіксувалися температура модуля та розраховане значення інсоляції. За результатами вимірювань побудовано вольт-амперні характеристики та залежності потужності від напруги, визначено основні параметри модуля, зокрема струм короткого замикання, напругу холостого ходу, максимальну потужність, напругу та струм у точці максимальної потужності. Також виконано оцінювання похибок вимірювання напруги, струму та непрямого визначення потужності.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні простої інформаційно-вимірювальної системи, яка дозволяє автоматизувати процес збору даних, будувати вольт-амперні характеристики фотоелектричних модулів, визначати точку максимальної потужності та оцінювати вплив зовнішніх факторів на ефективність роботи модуля. Результати роботи можуть бути використані для навчальних лабораторних досліджень, аналізу параметрів фотоелектричних модулів та подальшого вдосконалення систем моніторингу сонячних енергетичних установок.

Ключові слова: ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ, ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, СТРУМ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, НАПРУГА ХОЛОСТОГО ХОДУ, ТОЧКА МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ.

ABSTRACT

Pits E. O. "Development of an information and measurement system for monitoring the efficiency of photovoltaic Panels for solar system". Bachelor's thesis for obtaining the Bachelor's degree, as a manuscript. Specialty – 152 "Metrology and Information-Measuring Technology". – Ivano-Frankivsk, 2026.

The bachelor's thesis is devoted to the study of current-voltage characteristics of photovoltaic modules and the development of an information and measurement system for monitoring their efficiency. The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references and appendices. The total volume of the thesis is 84 pages, 26 figures and 8 tables. The number of references used is 23.

The thesis considers the operating principle of photovoltaic modules, their design features and main electrical characteristics; analyzes the current-voltage characteristics of photovoltaic modules and the factors affecting their shape; studies the influence of irradiance and temperature on the operating parameters of photovoltaic panels; and considers methods for determining the maximum power point based on the analysis of I-V characteristics.

An information and measurement system based on the Arduino Uno R3 microcontroller was developed to study the characteristics of the JKM425N-54HL4R photovoltaic module. The system includes a voltage sensor with a resistive voltage divider, an ACS758 current sensor, a DS18B20 temperature sensor, a BH1750 digital light intensity sensor, an LCD display, a microSD module for storing measurement results, and a rheostat load for changing the operating point of the module. The system provides automatic data acquisition, recording of measurement results, determination of the average current value, power calculation and detection of the maximum power point.

Measurements of the photovoltaic module parameters were carried out at different levels of solar irradiance. For each voltage value, a series of ten current measurements was performed with an interval of 1 s, while the module temperature and the calculated

irradiance value were also recorded. Based on the obtained measurement results, current-voltage characteristics and power-voltage dependences were plotted. The main parameters of the module were determined, including short-circuit current, open-circuit voltage, maximum power, and voltage and current at the maximum power point. The measurement errors of voltage, current and indirectly determined power were also evaluated.

The practical significance of the obtained results lies in the development of a simple information and measurement system that makes it possible to automate data acquisition, plot current-voltage characteristics of photovoltaic modules, determine the maximum power point and evaluate the influence of external factors on module efficiency. The results of the thesis can be used for educational laboratory studies, analysis of photovoltaic module parameters and further improvement of monitoring systems for solar power installations.

Keywords: PHOTOVOLTAIC MODULE, CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC, INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM, SOLAR ENERGY, SHORT-CIRCUIT CURRENT, OPEN-CIRCUIT VOLTAGE, MAXIMUM POWER POINT.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ	12
1.1 Принцип роботи фотоелектричних панелей	12
1.2 Види фотоелектричних панелей	15
1.3 Основні електричні характеристики фотоелектричних панелей	18
1.4 Вольт-амперна характеристика фотоелектричних панелей	21
Висновок до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	26
2.1 Методика побудови вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей.....	26
2.2 Вплив інсоляції на вольт-амперні характеристики фотоелектричних панелей	28
2.3 Вплив температури на характеристики фотоелектричних панелей	31
2.4 Визначення основних параметрів фотоелектричної панелі за вольт- амперною характеристикою	34
2.5 Оцінювання похибок вимірювання та обробка результатів	37
Висновок до розділу 2.....	41
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ВОЛЬТ- АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ	43
3.1 Опис вимірювальної установки	43
3.2 Методика проведення вимірювань	50
3.2 Алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи.....	53
3.3 Методика проведення вимірювань	59
3.4 Результати вимірювань та побудова вольт-амперних характеристик.....	62
3.5 Оцінювання похибок вимірювання	71
3.6 Аналіз отриманих результатів	77
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика.

ФЕМ – фотоелектричний модуль.

ФЕП – фотоелектрична панель.

СЕС – сонячна електростанція.

MPPT – відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking).

ККД – коефіцієнт корисної дії.

ПК – персональний комп'ютер.

DC – постійний струм (Direct Current).

AM 1.5 – стандартний спектр сонячного випромінювання Air Mass 1.5.

STC – стандартні умови випробувань (Standard Test Conditions).

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетики все більшого поширення набувають фотоелектричні системи, які дозволяють перетворювати сонячну енергію в електричну. Використання сонячних панелей є одним із перспективних напрямків розвитку відновлюваної енергетики завдяки екологічності, доступності та можливості автономного електропостачання. Ефективність роботи фотоелектричних панелей значною мірою залежить від зовнішніх факторів, зокрема рівня інсоляції, температури навколишнього середовища та режиму навантаження.

Для оцінювання технічного стану та ефективності роботи фотоелектричних панелей широко застосовується аналіз їх вольт-амперних характеристик. Вольт-амперна характеристика дозволяє визначити основні параметри панелі, зокрема напругу холостого ходу, струм короткого замикання, максимальну потужність та коефіцієнт заповнення. Отримання достовірних результатів потребує проведення точних вимірювань та подальшої обробки експериментальних даних.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності дослідження впливу рівня інсоляції на характеристики фотоелектричних панелей та оцінювання похибок вимірювання під час побудови вольт-амперних характеристик. Аналіз отриманих результатів дає можливість оцінити ефективність роботи панелей та визначити точність вимірювального процесу.

Метою роботи є розробка інформаційно-вимірювального підходу до моніторингу ефективності фотоелектричних панелей на основі опрацювання вольт-амперних характеристик та оцінювання похибок вимірювання при різних рівнях інсоляції.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати принцип роботи та основні характеристики фотоелектричних панелей;
- дослідити особливості побудови вольт-амперних характеристик;

- провести вимірювання струму та напруги фотоелектричної панелі при різних рівнях інсоляції;
- виконати обробку експериментальних даних у середовищі Excel;
- побудувати вольт-амперні характеристики та визначити основні параметри панелі;
- оцінити похибки вимірювання та проаналізувати їх вплив на результати дослідження.

Об'єктом дослідження є процес функціонування фотоелектричних панелей при різних рівнях сонячної інсоляції.

Предметом дослідження є вольт-амперні характеристики фотоелектричних панелей та похибки вимірювання їх параметрів.

У роботі використано методи експериментальних вимірювань, математичної обробки результатів, графічного аналізу та методи оцінювання похибок вимірювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованого підходу для оцінювання ефективності роботи фотоелектричних панелей та аналізу точності вимірювань при дослідженні параметрів сонячних енергетичних систем.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

1.1 Принцип роботи фотоелектричних панелей

Фотоелектричні панелі сьогодні є одним із найбільш поширених способів перетворення енергії Сонця в електричну енергію. Їх використовують як у невеликих автономних системах живлення, так і на великих сонячних електростанціях. Популярність фотоелектричних панелей пояснюється відносною простотою конструкції, відсутністю рухомих частин та можливістю безпосередньо отримувати електроенергію із сонячного випромінювання [1].

Основою роботи фотоелектричних панелей є фотоелектричний ефект. Його суть полягає в тому, що під дією світла в напівпровідниковому матеріалі виникають вільні носії електричного заряду. У результаті цього з'являється різниця потенціалів, а при підключенні навантаження через зовнішнє коло починає протікати електричний струм [2].

Фотоелектрична панель складається з великої кількості окремих фотоелектричних елементів, що також відображено на рисунку 1.1. Основним матеріалом для їх виготовлення є кремній. Це пов'язано з його хорошими напівпровідниковими властивостями та відносно невисокою вартістю виробництва. Для отримання електричного струму в кремнієвій пластині створюють дві області з різними електричними властивостями. Одна область має надлишок електронів, а інша – надлишок дірок. На межі між ними формується так званий р-п перехід, який є основою роботи фотоелектричного елемента [1].

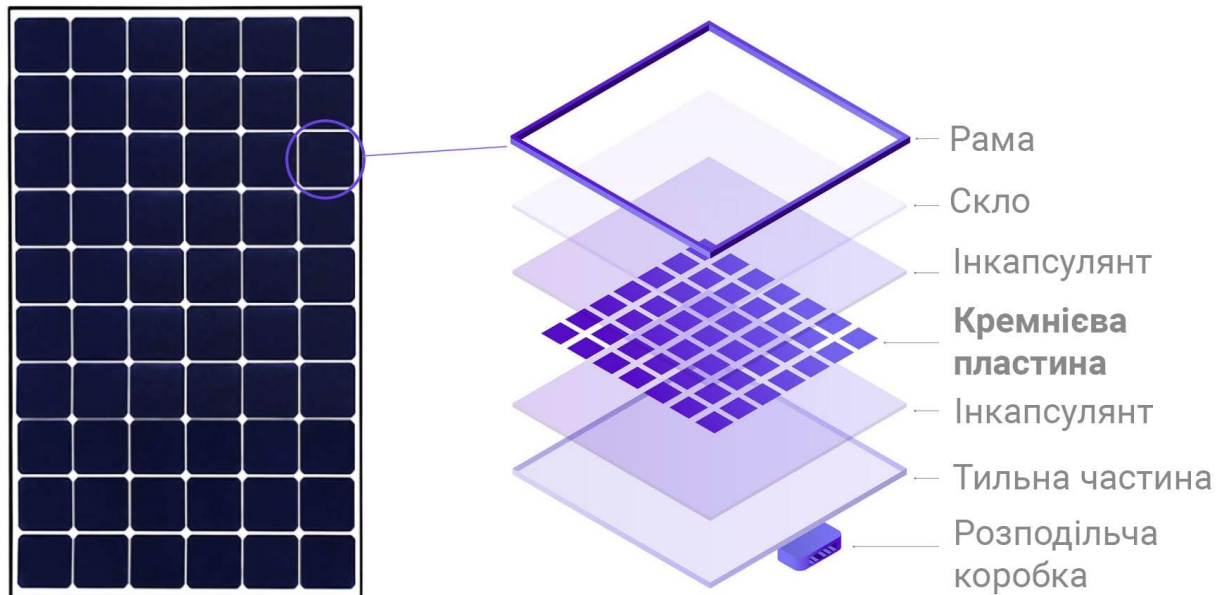


Рисунок 1.1 – Будова фотоелектричного елемента [3]

Коли сонячне випромінювання потрапляє на поверхню фотоелектричного елемента, фотони передають свою енергію електронам напівпровідника. У результаті цього частина електронів звільняється від атомних зв'язків та починає рухатися під дією внутрішнього електричного поля р-п переходу наведено на рис. 1.2. Внаслідок розділення зарядів між контактами фотоелектричного елемента виникає напруга. Якщо до елемента підключити навантаження, у зовнішньому колі почне протікати електричний струм [2].

Окремий фотоелектричний елемент виробляє невелику напругу, яка зазвичай не перевищує 0,5–0,6 В. Тому для практичного використання окремі елементи з'єднують між собою в модулі. Такі модулі, у свою чергу, формують фотоелектричні панелі необхідної потужності. Залежно від конструкції панелі можуть містити від кількох десятків до понад сотні фотоелектричних елементів.

Після генерації електричної енергії фотоелектричною панеллю утворюється постійний струм. Для живлення більшості побутових та промислових споживачів необхідний змінний струм, тому до складу фотоелектричної системи входить інвертор. Він перетворює постійний струм у змінний та забезпечує можливість використання виробленої електроенергії або її передачі до електричної мережі.

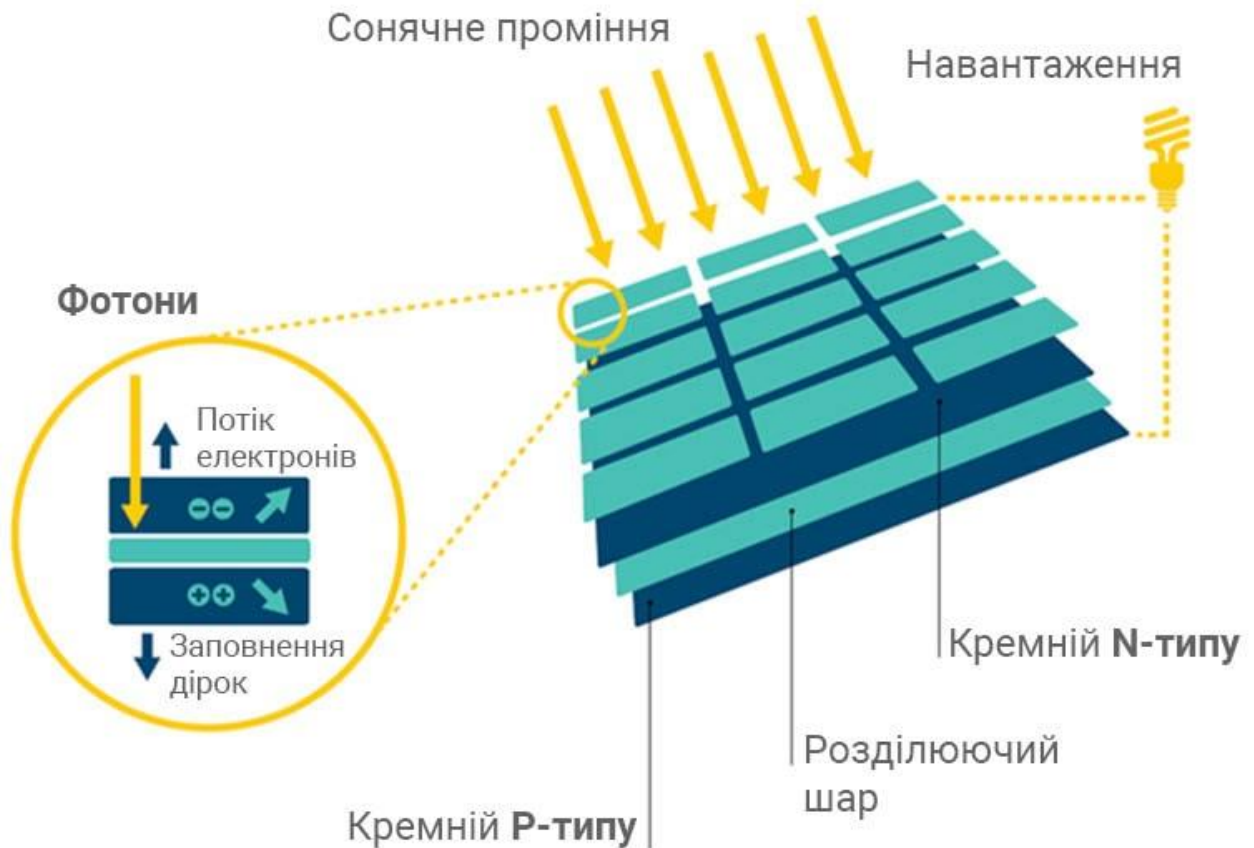


Рисунок 1.2 – Схема перетворення сонячної енергії в електричну [3]

На кількість виробленої електроенергії впливають різні фактори. Насамперед це інтенсивність сонячного випромінювання, температура фотоелектричних елементів, кут нахилу панелі та наявність затінення. При збільшенні інсоляції зростає кількість енергії, що надходить до поверхні панелі, а отже збільшується і виробіток електроенергії. Водночас підвищення температури зазвичай негативно впливає на ефективність роботи фотоелектричних модулів, оскільки призводить до зменшення вихідної напруги [1].

У процесі експлуатації фотоелектричної панелі її параметри можуть змінюватися залежно від зовнішніх умов. Для оцінювання ефективності роботи панелі використовують різні електричні характеристики, серед яких особливе місце займає вольт-амперна характеристика. Саме вона дозволяє отримати

інформацію про робочі режими панелі, визначити її основні параметри та оцінити вплив зовнішніх факторів на процес генерації електроенергії.

Оскільки предметом даної роботи є дослідження вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей та аналіз отриманих результатів вимірювань, наступним кроком доцільно розглянути основні види фотоелектричних панелей, які використовуються в сучасних сонячних енергетичних системах.

1.2 Види фотоелектричних панелей

За час розвитку сонячної енергетики було розроблено різні типи фотоелектричних панелей, які відрізняються матеріалами, конструкцією та технологією виготовлення. Незважаючи на конструктивні відмінності, усі вони працюють за однаковим принципом, що ґрунтується на фотоелектричному ефекті, тобто перетворенні енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Найбільшого поширення набули кремнієві фотоелектричні панелі, серед яких виділяють монокристалічні та полікристалічні модулі, а також тонкоплівкові панелі, в яких напівпровідниковий шар наноситься у вигляді тонкої плівки на спеціальну основу. Кожен із цих типів має свої особливості, переваги та сфери застосування, що зумовлює їх використання в сучасних фотоелектричних системах [4].

Монокристалічні фотоелектричні панелі виготовляються з кремнію, який має однорідну кристалічну структуру зображено на рис. 1.3. Для їх виробництва використовуються кремнієві зливки, з яких надалі виготовляються окремі фотоелектричні елементи. Завдяки високій чистоті матеріалу такі панелі характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії та стабільними робочими параметрами. Сучасні монокристалічні модулі можуть досягати ККД понад 20 %, що робить їх найбільш популярним рішенням як для побутових та і для промислових сонячних електростанцій.



Рисунок 1.3 – Монокристалічна фотоелектрична панель [5]

До переваг монокристалічних панелей належать висока ефективність роботи, тривалий термін експлуатації та менша необхідна площа встановлення для отримання заданої потужності. Разом з тим їх виробництво є складнішим порівняно з іншими технологіями, що впливає на кінцеву вартість обладнання.

Другим поширеним типом є полікристалічні фотоелектричні панелі, зображено на рис. 1.4. Для їх виготовлення використовується кремній, який складається з багатьох кристалів різної орієнтації. Технологія виробництва таких панелей є простішою, тому їх вартість зазвичай нижча. Протягом тривалого часу полікристалічні панелі широко використовувалися в сонячній енергетиці завдяки хорошему співвідношенню ціни та ефективності.



Рисунок 1.4 – Полікристалічна фотоелектрична панель [6]

Коефіцієнт корисної дії полікристалічних модулів зазвичай дещо нижчий, ніж у монокристалічних. Крім того, для отримання однакової потужності їм необхідна більша площа поверхні. Проте навіть сьогодні такі панелі залишаються поширеним рішенням на багатьох об'єктах, особливо там, де площа встановлення не є критичним фактором.

Окрему групу становлять тонкоплівкові фотоелектричні панелі, зображено ана рис. 1.5. На відміну від кристалічних модулів, у них напівпровідниковий шар наноситься тонкою плівкою на спеціальну основу. Для виготовлення можуть використовуватися різні матеріали, серед яких аморфний кремній, телурид кадмію та диселенід міді-індію-галію.



Рисунок 1.5 – Тонкоплівкова фотоелектрична панель [7]

Основною перевагою тонкоплівкових панелей є можливість виготовлення легких та гнучких конструкцій. Крім того, вони демонструють кращі показники роботи в умовах розсіяного освітлення. Водночас їх коефіцієнт корисної дії зазвичай нижчий порівняно з кристалічними панелями, тому для отримання однакової потужності потрібна більша площа встановлення.

Останніми роками виробники активно вдосконалюють технології виготовлення фотоелектричних панелей. З'являються двосторонні модулі, елементи типу PERC, TOPCon та HJT, які дозволяють підвищити ефективність перетворення сонячної енергії та покращити експлуатаційні характеристики панелей. Проте основні принципи роботи таких модулів залишаються аналогічними до традиційних кремнієвих фотоелектричних панелей.

Для подальшого дослідження вольт-амперних характеристик конкретний тип фотоелектричної панелі не має вирішального значення, оскільки основні електричні параметри визначаються однаковими методами. Незалежно від технології виготовлення для оцінювання роботи панелі використовуються напруга холостого ходу, струм короткого замикання, максимальна потужність та інші характеристики. Саме ці параметри будуть розглянуті в наступному підрозділі.

1.3 Основні електричні характеристики фотоелектричних панелей

Незалежно від типу фотоелектричної панелі, для оцінювання її роботи використовують ряд електричних характеристик. Саме ці параметри вказуються виробниками у технічній документації та дозволяють оцінити можливості панелі ще до її встановлення. Крім того, більшість із них надалі використовується під час аналізу вольт-амперних характеристик, тому їх розгляд є важливим для подальшого дослідження.

Одним із основних параметрів фотоелектричної панелі є напруга холостого ходу. Вона показує максимальне значення напруги на виході панелі за відсутності навантаження, тобто коли коло є розімкненим і струм не протікає. У технічній документації цей параметр зазвичай позначається як U_{xx} або V_{oc} . Значення напруги холостого ходу використовується під час вибору інверторів та проєктування фотоелектричних систем [1].

Іншою важливою характеристикою є струм короткого замикання. Він відповідає режиму, коли вихідні контакти панелі замкнені між собою, а напруга

дорівнює нулю. У цьому випадку струм досягає свого максимального значення. Струм короткого замикання значною мірою залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, тому часто використовується для оцінювання впливу інсоляції на роботу фотоелектричних модулів [1].

Під час реальної роботи панель не знаходиться ні в режимі холостого ходу, ні в режимі короткого замикання. Вона працює в певній робочій точці, яка визначається параметрами навантаження. Для кожного значення навантаження будуть існувати свої значення струму та напруги.

Однією з найважливіших характеристик є максимальна потужність фотоелектричної панелі. Саме цей параметр зазвичай зазначається у назві модуля. Наприклад, якщо виробник вказує потужність 550 Вт, то це означає, що за стандартних умов випробування панель здатна забезпечити саме таку потужність.

Потужність визначається за формулою[8]

$$P = U \cdot I, \quad (1.1)$$

де P – потужність, Вт;

U – напруга, В;

I – струм, А.

Максимальна потужність досягається лише в одній точці вольт-амперної характеристики, яка називається точкою максимальної потужності або MPP (Maximum Power Point). Саме в цій точці фотоелектрична панель працює найбільш ефективно та виробляє найбільшу кількість електричної енергії [1].

Для оцінювання ефективності перетворення сонячної енергії в електричну використовується коефіцієнт корисної дії. Він показує, яка частина сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню панелі, перетворюється на електричну енергію. Для сучасних монокристалічних модулів значення ККД зазвичай становить понад 20 %, хоча окремі сучасні моделі можуть мати й вищі показники.

Коефіцієнт корисної дії визначається за формулою[9]

$$\eta = (P_{\text{вих}} / P_{\text{вх}}) \cdot 100 (\%), \quad (1.2)$$

де η – коефіцієнт корисної дії, %;

$P_{\text{вих}}$ – вихідна електрична потужність, Вт;

$P_{\text{вх}}$ – потужність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню панелі, Вт.

Ще одним параметром, який часто використовується під час аналізу фотоелектричних модулів, є коефіцієнт заповнення. Він характеризує форму вольт-амперної характеристики та дозволяє оцінити якість роботи панелі. Чим ближчою є характеристика до прямокутної форми, тим більшим буде значення цього коефіцієнта [1].

Коефіцієнт заповнення визначається за формулою[10]

$$FF = (U_{\text{mpp}} \cdot I_{\text{mpp}}) / (U_{\text{хх}} \cdot I_{\text{кз}}), \quad (1.3)$$

де FF – коефіцієнт заповнення;

U_{mpp} – напруга в точці максимальної потужності, В;

I_{mpp} – струм у точці максимальної потужності, А;

$U_{\text{хх}}$ – напруга холостого ходу, В;

$I_{\text{кз}}$ – струм короткого замикання, А.

Перелічені характеристики зазвичай містяться в паспортних даних фотоелектричних панелей та використовуються для їх порівняння, наведено в рис. 1.6. Проте окремі значення струму, напруги або потужності не завжди дозволяють повністю оцінити роботу модуля. Значно більше інформації можна отримати за допомогою вольт-амперної характеристики, яка відображає зміну струму при зміні напруги та дозволяє визначити всі розглянуті параметри на одному графіку.

SPECIFICATIONS										
Module Type	JKM425N-54HL4R-B		JKM430N-54HL4R-B		JKM435N-54HL4R-B		JKM440N-54HL4R-B		JKM445N-54HL4R-B	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	425Wp	320Wp	430Wp	323Wp	435Wp	327Wp	440Wp	331Wp	445Wp	335Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	32.37V	30.19V	32.58V	30.30V	32.78V	30.50V	32.99V	30.73V	33.19V	30.93V
Maximum Power Current (Imp)	13.13A	10.60A	13.20A	10.66A	13.27V	10.72A	13.34A	10.77A	13.41A	10.83A
Open-circuit Voltage (Voc)	38.95V	37.00V	39.16V	37.20V	39.36V	37.39V	39.57V	37.59V	39.77V	37.78V
Short-circuit Current (Isc)	13.58A	10.96A	13.65A	11.02A	13.72A	11.08A	13.80A	11.14A	13.87A	11.20A
Module Efficiency STC (%)	21.27%		21.52%		21.77%		22.02%		22.27%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficient of Pmax	-0.29%/°C									
Temperature coefficient of Voc	-0.25%/°C									
Temperature coefficient of Isc	0.045%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

Рисунок 1.6 – Електричні параметри фотоелектричної панелі з паспорту [11]

1.4 Вольт-амперна характеристика фотоелектричних панелей

Під час аналізу роботи фотоелектричних панелей важливо не лише знати окремі значення напруги, струму або потужності, але й розуміти, як ці параметри змінюються залежно від режиму роботи панелі. Саме для цього використовується вольт-амперна характеристика (ВАХ), яка є однією з основних характеристик будь-якого фотоелектричного модуля.

Вольт-амперна характеристика являє собою графічну залежність струму, який генерує фотоелектрична панель, від напруги на її виході. Для її побудови необхідно виконати серію вимірювань при різних значеннях навантаження та визначити відповідні значення струму і напруги. Після нанесення отриманих результатів на графік формується характерна крива, за якою можна оцінити роботу панелі [1].

На одному кінці характеристики знаходиться точка короткого замикання. У цій точці напруга дорівнює нулю, а струм має максимальне значення. Саме цей параметр відповідає струму короткого замикання, який розглядався в попередньому підрозділі.

Інший край характеристики відповідає режиму холостого ходу. У цьому випадку коло розімкнене, тому струм дорівнює нулю, а напруга досягає максимального значення. Ця точка визначає напругу холостого ходу фотоелектричної панелі.

Між двома зазначеними точками знаходиться робоча область характеристики. Для кожного значення навантаження панель працює в певній точці кривої та забезпечує відповідні значення струму і напруги. Саме в цій області знаходиться точка максимальної потужності, яка має особливе значення для фотоелектричних систем.

Для кращого аналізу роботи фотоелектричної панелі часто додатково будують залежність потужності від напруги. Такий графік дозволяє легко визначити положення точки максимальної потужності та оцінити ефективність роботи модуля, зображено на рис. 1.7.

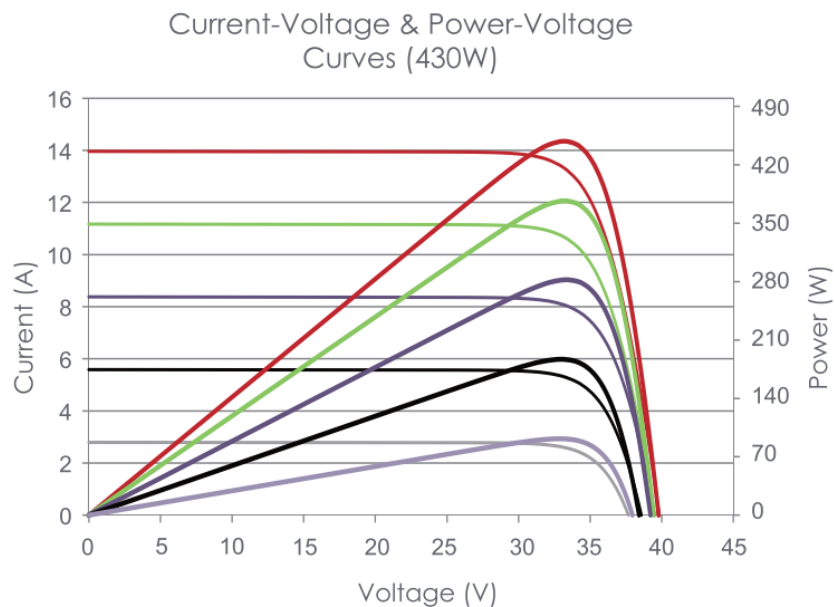


Рисунок 1.7 – Типова вольт-амперна характеристика фотоелектричної панелі [11]

На графіку потужності добре видно, що максимальне значення досягається лише в одній точці. Саме для роботи поблизу цієї точки сучасні інвертори використовують алгоритми MPPT (Maximum Power Point Tracking). Їхнім

завданням є постійний пошук оптимального режиму роботи фотоелектричної панелі та забезпечення максимально можливого виробітку електроенергії.

Форма вольт-амперної характеристики залежить від умов експлуатації фотоелектричної панелі. Найбільший вплив мають рівень сонячного випромінювання та температура фотоелектричних елементів. При збільшенні інсоляції зростає значення струму короткого замикання та максимальна потужність панелі. Підвищення температури, навпаки, призводить до зменшення напруги холостого ходу та зниження ефективності роботи модуля.

Зміна форми ВАХ часто використовується для оцінювання технічного стану фотоелектричних панелей. Відхилення характеристики від паспортних значень можуть свідчити про часткове затінення, забруднення поверхні, старіння елементів або виникнення внутрішніх дефектів. Саме тому аналіз вольт-амперних характеристик широко застосовується під час діагностики фотоелектричних систем.

У даній роботі вольт-амперна характеристика є основним джерелом інформації про роботу фотоелектричної панелі. Саме на основі отриманих ВАХ у подальших розділах будуть визначатися основні параметри модуля, оцінюватися вплив інсоляції та виконуватися аналіз похибок вимірювання.

Таким чином, вольт-амперна характеристика дозволяє комплексно оцінити роботу фотоелектричної панелі та визначити її основні параметри в різних умовах експлуатації. Подальше дослідження буде пов'язане з методикою отримання таких характеристик та аналізом результатів вимірювань.

Висновок до розділу 1

У першому розділі було розглянуто основні теоретичні відомості про фотоелектричні панелі та особливості їх роботи. Встановлено, що перетворення сонячної енергії в електричну відбувається завдяки фотоелектричному ефекту, який реалізується у фотоелектричних елементах на основі напівпровідникових матеріалів. Розглянуто загальний принцип роботи фотоелектричних панелей та їх місце у складі сонячних енергетичних систем.

Також було проаналізовано основні типи фотоелектричних панелей, які використовуються на сьогодні. Визначено, що найбільшого поширення набули монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові модулі. Незважаючи на відмінності у технології виготовлення та експлуатаційних характеристиках, усі вони працюють за однаковим принципом та можуть досліджуватися за допомогою однакових методів аналізу.

У розділі розглянуто основні електричні характеристики фотоелектричних панелей, зокрема напругу холостого ходу, струм короткого замикання, максимальну потужність, коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт заповнення. Саме ці параметри використовуються для оцінювання ефективності роботи фотоелектричних модулів та визначення їх технічних можливостей.

Особливу увагу приділено вольт-амперній характеристиці, яка дозволяє комплексно оцінити роботу фотоелектричної панелі. Показано, що за допомогою ВАХ можна визначити основні робочі параметри модуля, оцінити вплив зовнішніх факторів та встановити точку максимальної потужності. Крім того, аналіз форми характеристики дає можливість оцінювати технічний стан фотоелектричної панелі та виявляти відхилення в її роботі.

Отримані в першому розділі теоретичні відомості є основою для подальшого дослідження. У наступному розділі буде розглянуто методику побудови та аналізу вольт-амперних характеристик, вплив основних зовнішніх факторів на їх форму та

особливості визначення параметрів фотоелектричних панелей за результатами вимірювань.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

2.1 Методика побудови вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей

Після розгляду основних характеристик фотоелектричних панелей доцільно перейти до методів їх дослідження. Одним із найбільш поширених способів оцінювання роботи фотоелектричних модулів є аналіз вольт-амперної характеристики. Саме за допомогою ВАХ можна визначити основні параметри панелі, оцінити вплив зовнішніх факторів на її роботу та порівняти фактичні характеристики з паспортними даними.

Для побудови вольт-амперної характеристики необхідно отримати декілька значень струму та напруги при різних режимах роботи фотоелектричної панелі. Чим більша кількість вимірюваних точок, тим точніше буде відображено форму характеристики та тим легше буде виконати подальший аналіз результатів.

У промислових умовах для побудови ВАХ використовують спеціальні вимірювальні комплекси та аналізатори фотоелектричних модулів. Таке обладнання дозволяє автоматично змінювати навантаження та отримувати велику кількість вимірювань за короткий проміжок часу. Проте для навчальних і дослідницьких цілей побудову характеристики можна виконати значно простішим способом, використовуючи стандартні вимірювальні прилади [1].

У даній роботі отримання вольт-амперних характеристик буде виконуватися експериментальним методом за допомогою вольтметра, амперметра та змінного навантаження. Під час проведення вимірювань навантаження поступово змінюється, а для кожного режиму фіксуються значення струму та напруги на виході фотоелектричної панелі.

На початку вимірювань навантаження встановлюється таким чином, щоб забезпечити значення струму, близькі до струму короткого замикання. Поступово

змінюючи опір навантаження, отримують нові значення струму та напруги. Процес продовжується до моменту наближення режиму роботи панелі до холостого ходу. У результаті формується набір експериментальних даних, який містить координати точок майбутньої вольт-амперної характеристики.

Під час проведення вимірювань важливо забезпечити стабільність зовнішніх умов. Фотоелектричні панелі є джерелами енергії, характеристики яких безпосередньо залежать від рівня сонячного випромінювання та температури. Навіть короточасна поява хмарності може вплинути на результати вимірювання та змінити форму характеристики. Саме тому бажано виконувати дослідження за максимально стабільних погодних умов або додатково фіксувати значення інсоляції під час проведення експерименту.

Після завершення вимірювань усі отримані значення заносяться до таблиці результатів. Для кожної точки фіксуються напруга та струм, після чого за формулою (1.1) визначається відповідна потужність. Це дозволяє не лише побудувати ВАХ, але й проаналізувати зміну потужності залежно від режиму роботи панелі.

На наступному етапі отримані результати опрацьовуються за допомогою програмних засобів. Для виконання розрахунків та побудови графічних залежностей використовується Microsoft Excel. Після визначення середніх значень струму та обчислення потужності для кожної експериментальної точки виконується оцінювання похибок вимірювання.

Абсолютні похибки вимірювання напруги та струму визначаються на основі класів точності використаних аналогових приладів. Оскільки потужність фотоелектричного модуля є непрямо вимірюваною величиною та визначається як добуток напруги та струму, оцінювання похибки потужності проводиться за методикою поширення невизначеності непрямих вимірювань. При цьому похибка потужності визначається з урахуванням внеску похибок вимірювання напруги та струму відповідно до загального закону поширення невизначеності.

За результатами обробки даних будується графік залежності струму від напруги, який і є вольт-амперною характеристикою фотоелектричної панелі. На його основі надалі визначаються напруга холостого ходу, струм короткого замикання, точка максимальної потужності та інші параметри, необхідні для аналізу ефективності роботи фотоелектричного модуля.

Таким чином, побудова ВАХ є основою подальшого дослідження фотоелектричних панелей. Саме від правильності виконання вимірювань та обробки результатів залежить точність визначення основних параметрів панелі та достовірність подальших висновків. Наступним етапом є розгляд впливу інсоляції на форму вольт-амперної характеристики та робочі параметри фотоелектричних модулів.

2.2 Вплив інсоляції на вольт-амперні характеристики фотоелектричних панелей

Одним із головних факторів, що впливають на роботу фотоелектричних панелей, є рівень сонячного випромінювання. Саме від кількості сонячної енергії, яка потрапляє на поверхню фотоелектричного модуля, залежить величина струму, потужності та загальна ефективність роботи системи. Тому під час дослідження вольт-амперних характеристик необхідно враховувати умови освітленості, за яких виконуються вимірювання.

Для оцінювання сонячного випромінювання використовується поняття інсоляції. У сонячній енергетиці під інсоляцією зазвичай розуміють потужність сонячного випромінювання, що надходить на одиницю площі поверхні. Вона вимірюється у Вт/м^2 . Під час випробування фотоелектричних панелей виробники найчастіше використовують стандартні умови тестування, за яких інсоляція становить 1000 Вт/м^2 , температура фотоелектричного елемента дорівнює 25°C , а спектральний склад випромінювання відповідає умовам АМ 1.5 [1].

На практиці такі умови спостерігаються не завжди. Протягом дня рівень сонячного випромінювання постійно змінюється залежно від положення Сонця, хмарності, пори року та інших факторів. Саме тому фактична потужність фотоелектричних панелей часто відрізняється від значень, зазначених у технічній документації.

Коли інсоляція збільшується, на поверхню фотоелектричного елемента потрапляє більша кількість фотонів. У результаті цього утворюється більше вільних носіїв заряду, що призводить до збільшення вихідного струму. Найбільш помітно цей процес проявляється у зміні струму короткого замикання. Для більшості фотоелектричних модулів залежність струму короткого замикання від інсоляції є близькою до лінійної, що наведено на рис. 2.1.

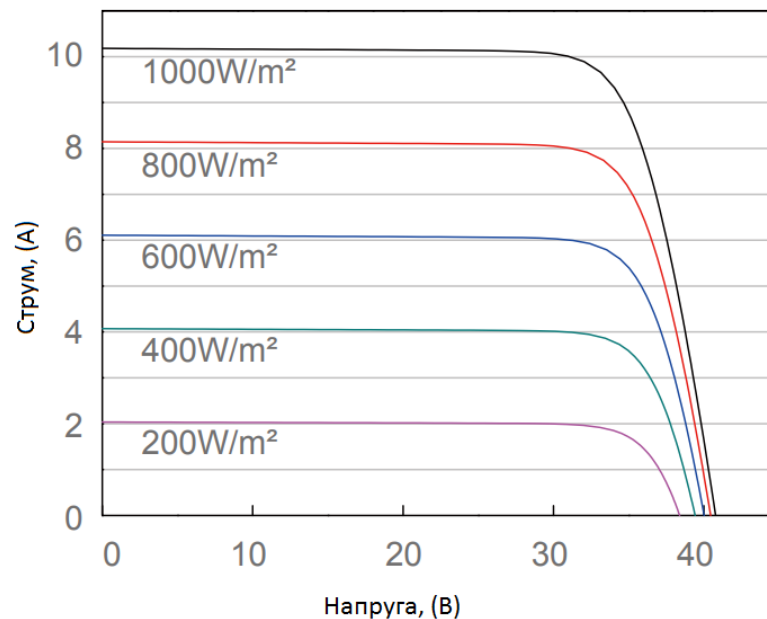


Рисунок 2.1 – Вольт-амперні характеристики фотоелектричної панелі при різних рівнях інсоляції [12]

З аналізу характеристик видно, що зі збільшенням інсоляції відбувається підняття кривої вольт-амперної характеристики. При цьому значення струму для однакових значень напруги стає більшим. Напруга холостого ходу також

змінюється, проте значно менше порівняно зі струмом. Саме тому основний вплив інсоляції проявляється через зміну вихідного струму панелі.

Оскільки потужність визначається добутком струму та напруги відповідно до формули (1.1), збільшення струму призводить до зростання максимальної потужності фотоелектричного модуля. Це добре помітно при порівнянні характеристик, отриманих за різних рівнів освітленості. За високої інсоляції точка максимальної потужності зміщується в область більших значень потужності, а виробіток електроенергії зростає.

Для більш детального аналізу часто додатково будують графік залежності потужності від напруги, який наведено на рис. 2.2. На такому графіку добре видно зміну положення точки максимальної потужності при різних рівнях сонячного випромінювання.

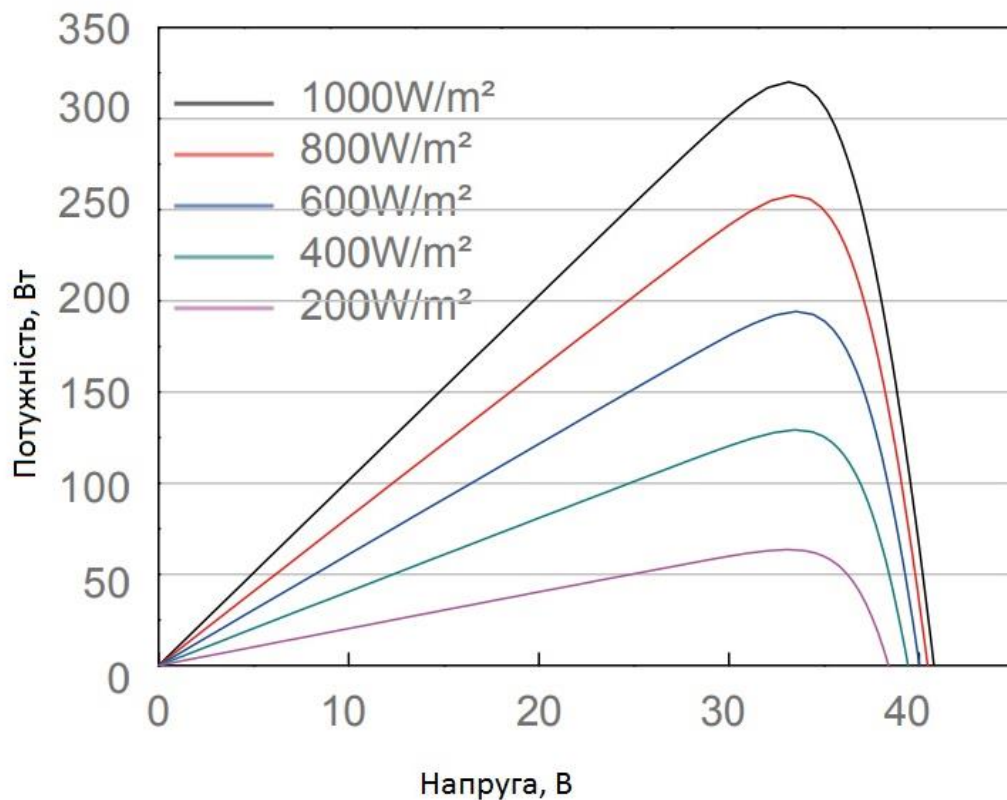


Рисунок 2.2 – Залежність потужності від напруги при різних рівнях інсоляції [12]

Під час проведення експериментальних досліджень вплив інсоляції необхідно враховувати особливо уважно. Якщо під час вимірювань відбувається зміна погодних умов, отримані характеристики можуть суттєво відрізнятися одна від одної навіть за однакових налаштувань навантаження. Саме тому бажано виконувати всі вимірювання протягом короткого проміжку часу або фіксувати рівень сонячного випромінювання для кожної серії вимірювань.

У даній роботі дослідження впливу інсоляції є одним із ключових завдань. Отримані вольт-амперні характеристики будуть порівнюватися між собою для різних умов освітлення, що дозволить оцінити зміну основних параметрів фотоелектричної панелі та визначити особливості її роботи за різних рівнів сонячного випромінювання.

Окрім інсоляції, на характеристики фотоелектричних панелей впливає температура їх поверхні. У деяких випадках навіть при високому рівні сонячного випромінювання підвищення температури може призводити до зменшення ефективності роботи модуля. Тому наступний підрозділ буде присвячений аналізу температурного впливу на параметри фотоелектричних панелей.

2.3 Вплив температури на характеристики фотоелектричних панелей

Під час роботи фотоелектричних панелей на їх характеристики впливає не лише рівень сонячного випромінювання, але й температура фотоелектричних елементів. Цей фактор часто недооцінюють, оскільки зазвичай вважається, що збільшення сонячного випромінювання завжди призводить до покращення роботи панелі. Насправді ж підвищення температури може частково компенсувати позитивний вплив високої інсоляції та зменшувати ефективність роботи фотоелектричного модуля [1].

Паспортні характеристики більшості фотоелектричних панелей визначаються за стандартних умов випробування, коли температура фотоелектричного елемента становить 25 °C. У реальних умовах експлуатації

температура поверхні панелі часто значно перевищує це значення. У сонячний літній день температура фотоелектричних модулів може досягати 50–70 °С, а інколи навіть більше. Саме тому фактичні параметри панелі нерідко відрізняються від значень, зазначених виробником.

Зі збільшенням температури в напівпровідниковому матеріалі відбуваються процеси, які впливають на рух носіїв заряду. Найбільш помітним наслідком є зменшення напруги холостого ходу. При цьому струм короткого замикання змінюється незначно і в більшості випадків навіть дещо збільшується. Однак цього недостатньо для компенсації втрат, пов'язаних зі зниженням напруги. Наведено на рис. 2.3

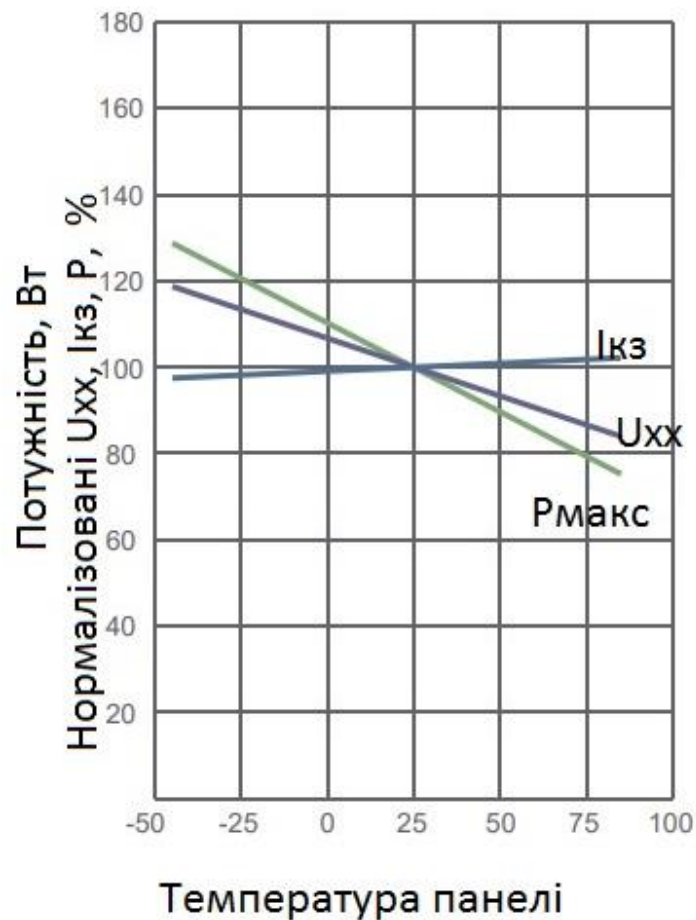


Рисунок 2.3 – Вплив температури на вольт-амперну характеристику фотоелектричної панелі [12]

Якщо порівняти декілька вольт-амперних характеристик, отриманих при різних температурах, можна помітити, що зі зростанням температури відбувається зміщення характеристики вліво. Це означає, що для однакових значень струму напруга стає меншою. У результаті зменшується площа під характеристикою та знижується максимальна потужність фотоелектричної панелі.

Вплив температури добре помітний і на графіку залежності потужності від напруги. При підвищенні температури максимум кривої поступово зміщується в область менших значень напруги, а сама максимальна потужність зменшується. Саме тому в літній період фактична потужність сонячної електростанції може бути нижчою за очікувану навіть за високої інтенсивності сонячного випромінювання.

Для оцінювання температурного впливу виробники вказують у технічній документації температурні коефіцієнти. Найчастіше вони наводяться для напруги холостого ходу, струму короткого замикання та максимальної потужності. Температурний коефіцієнт показує, наскільки зміниться відповідний параметр при зміні температури на один градус Цельсія.

Наприклад, якщо температурний коефіцієнт потужності становить $-0,35\%/^{\circ}\text{C}$, то при підвищенні температури фотоелемента на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ відносно стандартних умов максимальна потужність панелі зменшиться приблизно на $3,5\%$. Для сучасних монокристалічних модулів значення температурного коефіцієнта потужності зазвичай знаходиться в межах від $-0,3$ до $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$.

Зміна максимальної потужності фотоелектричного модуля при відхиленні температури від стандартних умов може бути визначена за формулою [13]

$$P = P_{\text{STC}} \cdot [1 + \gamma(T - T_{\text{STC}})], \quad (2.1)$$

де P – потужність фотоелектричного модуля при температурі T , Вт;

P_{STC} – потужність модуля за стандартних умов випробувань, Вт;

γ – температурний коефіцієнт потужності, $1/^{\circ}\text{C}$;

T – фактична температура фотоелемента, $^{\circ}\text{C}$;

T_{STC} – температура фотоелемента за стандартних умов, яка дорівнює 25°C .

Дана залежність дозволяє оцінити вплив температури на вихідну потужність фотоелектричного модуля та врахувати зміну його параметрів при відхиленні від стандартних умов випробувань.

Під час проєктування сонячних електростанцій вплив температури намагаються зменшити за рахунок природного охолодження панелей. Для цього між поверхнею даху та фотоелектричними модулями залишають вентиляційний зазор, який забезпечує циркуляцію повітря. У наземних сонячних електростанціях охолодження зазвичай відбувається ефективніше завдяки вільному доступу повітря до задньої поверхні панелей.

У рамках даної роботи температура не буде основним об'єктом дослідження, проте її вплив необхідно враховувати під час аналізу результатів вимірювань. Якщо характеристики будуть отримані в різний час доби або за різних погодних умов, температура поверхні панелі може бути однією з причин відмінностей між результатами.

Таким чином, температура є важливим фактором, який впливає на роботу фотоелектричних панелей та форму їх вольт-амперних характеристик. Врахування температурного впливу дозволяє більш об'єктивно оцінювати результати вимірювань та пояснювати можливі відхилення від паспортних характеристик модулів. Після розгляду впливу інсоляції та температури доцільно перейти до визначення основних параметрів фотоелектричної панелі за результатами аналізу вольт-амперної характеристики.

2.4 Визначення основних параметрів фотоелектричної панелі за вольт-амперною характеристикою

Після побудови вольт-амперної характеристики можна перейти до визначення основних параметрів фотоелектричної панелі. Саме аналіз ВАХ

дозволяє отримати найбільш повну інформацію про роботу модуля, оскільки всі ключові електричні характеристики можуть бути визначені безпосередньо з графіка. Завдяки цьому вольт-амперна характеристика широко використовується як під час досліджень, так і під час діагностики фотоелектричних систем [1].

Одним із перших параметрів, який визначають за ВАХ, є струм короткого замикання. Він відповідає точці перетину характеристики з віссю струму. У цьому режимі напруга на виході панелі дорівнює нулю, а струм досягає максимального значення. Струм короткого замикання використовується для оцінювання впливу інсоляції на роботу фотоелектричного модуля та є одним із основних параметрів, що наводяться в технічній документації виробника.

Іншим важливим параметром є напруга холостого ходу. Вона визначається в точці перетину характеристики з віссю напруги. У цьому випадку коло є розімкненим, тому струм дорівнює нулю. Напруга холостого ходу використовується під час проєктування фотоелектричних систем та вибору інверторного обладнання.

Під час роботи фотоелектричної панелі найбільший інтерес становить не режим холостого ходу чи короткого замикання, а режим максимальної потужності. Саме в цій точці фотоелектрична панель виробляє найбільшу кількість електричної енергії. Точка максимальної потужності розташовується між двома крайніми точками характеристики та визначається значеннями струму і напруги, при яких добуток цих величин є найбільшим [1].

Для визначення точки максимальної потужності за результатами вимірювань необхідно для кожної експериментальної точки розрахувати потужність відповідно до формули (1.1). Після цього отримані значення порівнюються між собою та визначається найбільше з них. Значення струму та напруги, які відповідають цьому максимуму, і будуть координатами точки максимальної потужності.

У сучасних системах моніторингу та діагностики фотоелектричних модулів для визначення точки максимальної потужності можуть використовуватися

спеціалізовані пристрої типу IV Curve Tracer, які дозволяють автоматично виконувати побудову вольт-амперної характеристики та залежності потужності від напруги. На основі отриманих даних такі пристрої визначають значення напруги та струму, що відповідають точці максимальної потужності фотоелектричного модуля. Як приклад роботи подібних пристроїв на рисунку 2.4 наведено визначення точки максимальної потужності за результатами аналізу вольт-амперної характеристики.

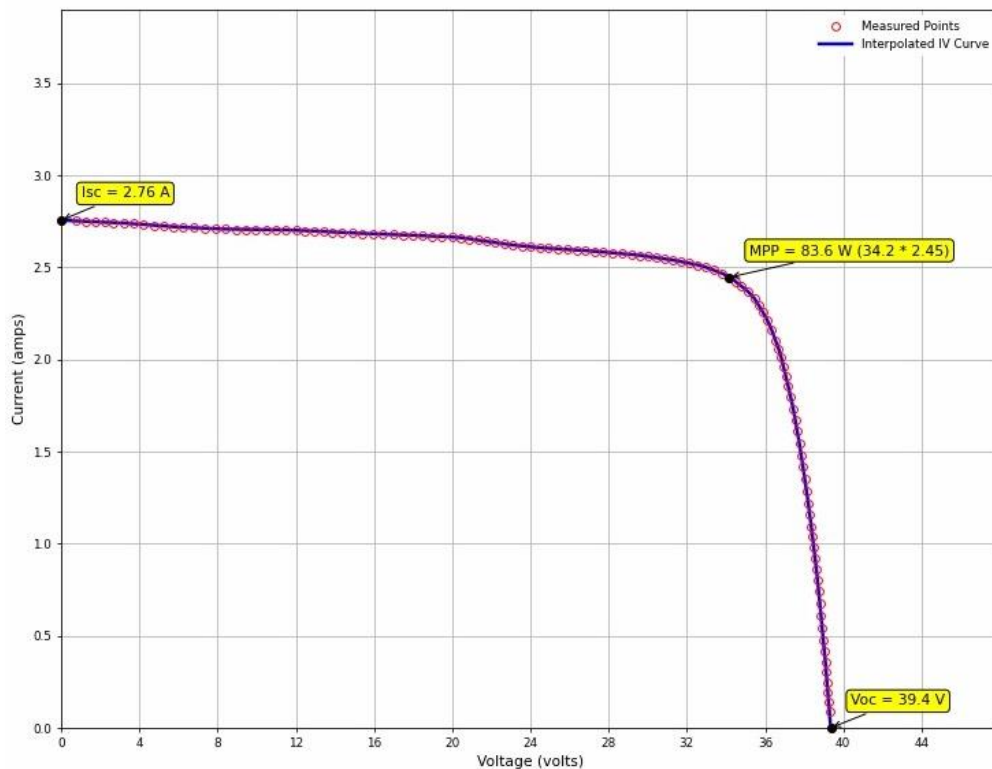


Рисунок 2.4 – Визначення точки максимальної потужності за результатами вимірювань [12]

Крім основних параметрів, за допомогою вольт-амперної характеристики можна визначити коефіцієнт заповнення. Для цього використовуються значення струму короткого замикання, напруги холостого ходу та параметри точки максимальної потужності. Коефіцієнт заповнення дозволяє оцінити якість фотоелектричного модуля та ступінь наближення реальної характеристики до ідеальної форми.

Під час аналізу отриманих характеристик також можна оцінити вплив зовнішніх факторів на роботу фотоелектричної панелі. Наприклад, зміна положення точки максимальної потужності може свідчити про зміну інсоляції або температури. Якщо ж форма характеристики суттєво відрізняється від очікуваної, це може бути ознакою затінення, забруднення поверхні або інших факторів, які впливають на ефективність роботи модуля.

Визначення основних параметрів за ВАХ є одним із найважливіших етапів аналізу фотоелектричних панелей. Саме ці параметри надалі використовуються для оцінювання ефективності роботи модуля та порівняння результатів, отриманих за різних умов експлуатації.

У даній роботі всі розглянуті параметри будуть визначатися за результатами експериментальних вимірювань. Отримані значення використовуватимуться для подальшого аналізу роботи фотоелектричної панелі та оцінювання впливу похибок вимірювання на кінцеві результати дослідження.

2.5 Оцінювання похибок вимірювання та обробка результатів

Під час проведення будь-яких експериментальних досліджень отримані результати завжди містять певну похибку. Це пов'язано як з обмеженою точністю вимірювальних приладів, так і з впливом зовнішніх факторів на процес вимірювання. Дослідження вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей не є винятком, тому оцінювання похибок є важливою складовою аналізу отриманих результатів.

У даній роботі основними вимірюваними величинами будуть напруга та струм фотоелектричної панелі. Значення цих параметрів визначатимуться за допомогою вольтметра та амперметра. Точність отриманих результатів безпосередньо залежить від класу точності приладів, умов проведення вимірювань та правильності зняття показів.

Одним із джерел похибки є інструментальна похибка, яка обумовлена конструктивними особливостями вимірювальних приладів. Навіть справний прилад не може забезпечити абсолютно точне вимірювання, тому отримане значення завжди певною мірою відрізняється від істинного [14].

Окрім інструментальної похибки, під час дослідження фотоелектричних панелей можуть виникати похибки, пов'язані зі зміною зовнішніх умов. До таких факторів належать зміна рівня сонячного випромінювання, нагрівання поверхні панелі, поява хмарності або зміна кута падіння сонячних променів. Якщо між окремими вимірюваннями проходить значний проміжок часу, вплив цих факторів може бути досить помітним.

Для оцінювання точності результатів часто використовують абсолютну та відносну похибки вимірювання.

Абсолютна похибка визначається за формулою[15]

$$\Delta = |X_{\text{вим}} - X_{\text{дійс}}|, \quad (2.2)$$

де Δ – абсолютна похибка;

$X_{\text{вим}}$ – виміряне значення величини;

$X_{\text{дійс}}$ – дійсне або еталонне значення величини.

Абсолютна похибка дозволяє оцінити, наскільки результат вимірювання відрізняється від реального значення величини.

Для більш наочного оцінювання якості вимірювань зазвичай використовують відносну похибку, яка визначається у відсотках[15]

$$\delta = (\Delta / X_{\text{дійс}}) \cdot 100 \%, \quad (2.3)$$

де δ – відносна похибка, %;

Δ – абсолютна похибка.

Відносна похибка дозволяє порівнювати точність вимірювання різних величин незалежно від їх абсолютних значень [14].

Під час дослідження вольт-амперних характеристик похибки напруги та струму безпосередньо впливають на точність визначення потужності фотоелектричної панелі. Оскільки потужність розраховується за формулою (1.1), похибки вихідних вимірювань переходять і в результати подальших розрахунків.

У даній роботі після отримання експериментальних даних усі результати будуть опрацьовуватися за допомогою Microsoft Excel. Використання електронних таблиць дозволяє значно спростити виконання розрахунків та зменшити кількість арифметичних помилок під час обробки результатів.

За допомогою Excel планується виконати:

- розрахунок потужності для кожної експериментальної точки;
- побудову вольт-амперних характеристик;
- побудову графіків залежності потужності від напруги;
- визначення точки максимальної потужності;
- оцінювання абсолютних та відносних похибок.

Після завершення розрахунків отримані результати можуть бути представлені у вигляді таблиць та графіків. Графічне подання даних дозволяє значно спростити аналіз характеристик фотоелектричної панелі та наочно продемонструвати вплив різних факторів на її роботу.

Оцінювання похибок є важливим етапом дослідження, оскільки дозволяє визначити достовірність отриманих результатів та оцінити якість проведених вимірювань. Саме тому в експериментальній частині роботи поряд із побудовою вольт-амперних характеристик буде виконано аналіз точності вимірювань та розрахунок відповідних похибок.

Таким чином, розглянуті методи обробки результатів та оцінювання похибок створюють теоретичну основу для виконання практичної частини роботи.

У наступному розділі буде наведено результати експериментальних досліджень фотоелектричної панелі, виконано побудову вольт-амперних характеристик та проведено аналіз отриманих даних.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було розглянуто теоретичні основи побудови та аналізу вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей. Встановлено, що ВАХ є одним із найбільш інформативних способів оцінювання роботи фотоелектричного модуля, оскільки дозволяє визначити його основні електричні параметри та проаналізувати вплив зовнішніх факторів на процес генерації електроенергії.

Розглянуто методику побудови вольт-амперних характеристик шляхом послідовного вимірювання струму та напруги при різних режимах навантаження. Показано, що отримані експериментальні дані можуть бути використані для побудови ВАХ та подальшого визначення основних параметрів фотоелектричної панелі.

Проаналізовано вплив інсоляції на характеристики фотоелектричних модулів. Встановлено, що зі збільшенням рівня сонячного випромінювання зростають значення струму короткого замикання та максимальної потужності панелі. Також розглянуто вплив температури, який проявляється насамперед у зменшенні напруги холостого ходу та зниженні ефективності роботи фотоелектричного модуля.

Окрему увагу приділено визначенню основних параметрів фотоелектричної панелі за результатами аналізу вольт-амперної характеристики. Розглянуто способи визначення струму короткого замикання, напруги холостого ходу, точки максимальної потужності та коефіцієнта заповнення, які використовуються для оцінювання ефективності роботи панелі.

Також було розглянуто основні види похибок, які можуть виникати під час проведення вимірювань, та наведено методи їх оцінювання. Показано можливості використання Microsoft Excel для обробки експериментальних даних, виконання необхідних розрахунків і побудови графічних залежностей.

Отримані теоретичні відомості створюють основу для виконання практичної частини роботи. У наступному розділі буде проведено експериментальне

дослідження фотоелектричної панелі, побудовано вольт-амперні характеристики за результатами вимірювань, визначено основні параметри модуля та виконано оцінювання похибок отриманих результатів.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

3.1 Опис вимірювальної установки

Для проведення експериментальних досліджень розроблено інформаційно-вимірювальну систему на базі мікроконтролерної плати Arduino Uno R3. Основним призначенням установки є автоматизоване отримання вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля, збереження результатів вимірювань, визначення точки максимальної потужності та подальший аналіз ефективності роботи фотоелектричного модуля при різних рівнях інсоляції.

На відміну від ручних вимірювань, у розробленій системі функції збору та обробки даних покладаються на мікроконтролер. Зчитування напруги та струму здійснюється з дискретністю 1 с. Для кожного значення напруги виконується 10 послідовних вимірювань, після чого система обчислює середні значення параметрів та виводить повідомлення про необхідність переходу до наступного режиму роботи. Зміна робочої точки фотоелектричного модуля виконується вручну за допомогою реостата. Значення напруги змінюються приблизно з кроком 1 В, тому загальна кількість експериментальних точок визначається фактичним діапазоном роботи модуля.

Об'єктом дослідження є монокристалічний фотоелектричний модуль Jinko Solar JKM425N-54HL4R номінальною потужністю 425 Вт, зображений на рис. 3.1. Згідно з технічним паспортом, напруга в точці максимальної потужності становить 32,18 В, струм у точці максимальної потужності – 13,21 А, напруга холостого ходу – 38,75 В, а струм короткого замикання – 13,66 А [11]. Саме ці параметри були враховані при виборі елементів експериментальної установки.

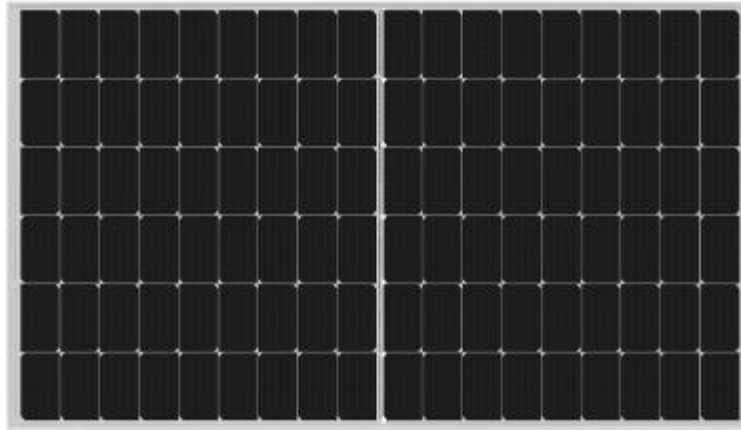


Рисунок 3.1 – Фотоелектричний модуль Jinko Solar JKM425N-54HL4R [11]

Основним елементом інформаційно-вимірювальної системи є мікроконтролерна плата Arduino Uno R3, зображений на рис. 3.2 побудована на базі мікроконтролера ATmega328P. Плата виконує функції зчитування сигналів з датчиків, обробки вимірювань, визначення поточної потужності, пошуку точки максимальної потужності, відображення інформації на дисплеї та запису результатів вимірювань на карту пам'яті.

Основні характеристики Arduino Uno R3:

- мікроконтролер ATmega328P;
- робоча напруга 5 В;
- тактова частота 16 МГц;
- 6 аналогових входів;
- 14 цифрових входів-виходів;
- 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач.



Рисунок 3.2 – Плата Arduino Uno R3 [16]

Для вимірювання напруги фотоелектричного модуля використовується датчик напруги, реалізований на основі резистивного подільника. Оскільки максимальна напруга фотомодуля становить майже 40 В, а аналогові входи Arduino допускають напругу не більше 5 В, використовується подільник на резисторах 100 кОм та 10 кОм. Такий подільник забезпечує коефіцієнт поділу, близький до 11, що дозволяє вимірювати напругу до 50 В.

Напруга на виході подільника визначається за формулою[17]

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{фм}} \cdot R_2 / (R_1 + R_2), \quad (3.1)$$

де $U_{\text{фм}}$ – напруга фотомодуля, В;

$R_1 = 100 \text{ кОм}$;

$R_2 = 10 \text{ кОм}$.

Для відновлення дійсного значення напруги використовується співвідношення

$$U_{\text{фм}} = U_{\text{вих}} \cdot (R1+R2)/R2. \quad (3.2)$$

Основні характеристики вузла вимірювання напруги:

- діапазон вимірювання 0–50 В;
- коефіцієнт поділу 11;
- вихідна напруга 0–5 В;
- використання 10-розрядного АЦП Arduino.

Вимірювання струму виконується за допомогою датчика ACS758-020В, зображено на рисунку 3.3, робота якого базується на ефекті Холла. Вибір саме цього датчика обумовлений тим, що струм короткого замикання досліджуваного модуля становить 13,66 А, тому діапазон ± 20 А забезпечує достатній запас та дозволяє отримати кращу точність вимірювання порівняно з датчиками на більші струми.

Датчик ACS758-020В підключається послідовно між фотомодулем та навантаженням, а вихідний сигнал надходить на аналоговий вхід мікроконтролера.

Основні характеристики датчика струму:

- діапазон вимірювання ± 20 А;
- робоча напруга 5 В;
- аналоговий вихід;
- принцип роботи – ефект Холла;
- гальванічна розв'язка силового кола та вимірювальної частини.

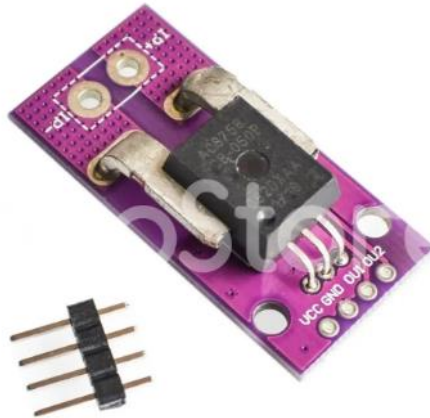


Рисунок 3.3 – Датчик струму ACS758-020В [18]

Для створення змінного навантаження використовується дротяний реостат опором 20 Ом та максимальною потужністю розсіювання 500 Вт, зображено на рисунку 3.4 [19]. Переміщення повзунка реостата дозволяє змінювати робочу точку фотоелектричного модуля та отримувати необхідні значення напруги. Після завершення серії вимірювань для поточного значення напруги система виводить повідомлення на дисплей, після чого оператор змінює положення повзунка реостата та переходить до наступної точки вимірювання.

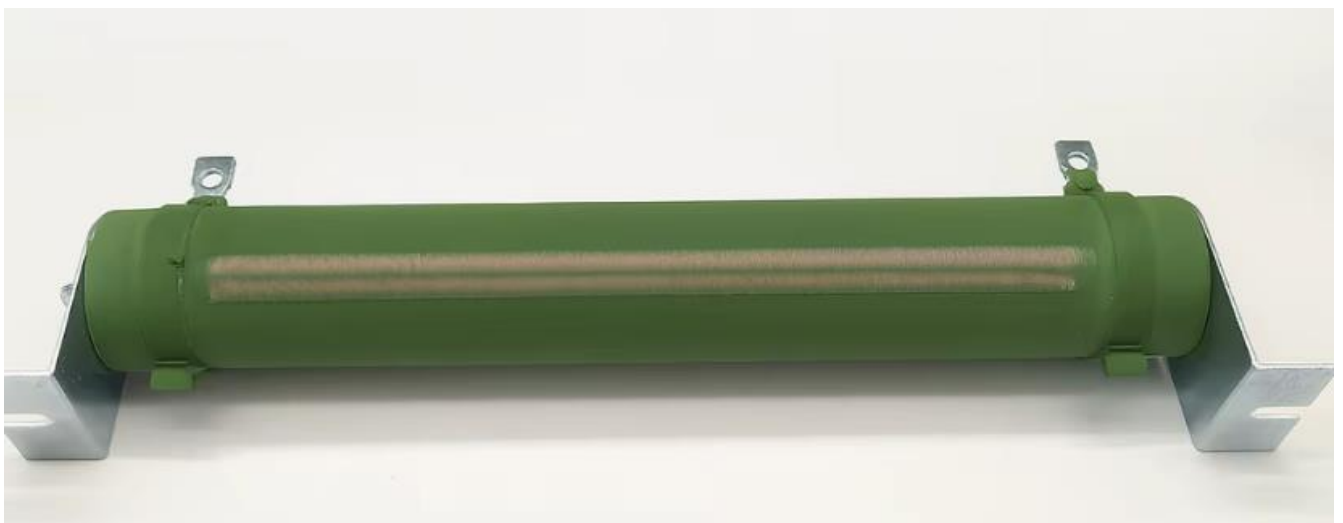


Рисунок 3.4 – Реостат 20 Ом, 500 Вт [19]

Для контролю температури фотоелектричного модуля використовується цифровий датчик DS18B20, зображено на рис. 3.5, який встановлюється на тильній стороні фотомодуля. Вимірювання температури дозволяє враховувати вплив нагрівання модуля на його характеристики.

Основні характеристики датчика DS18B20:

- діапазон вимірювання від -55 до $+125$ °C;
- типова похибка $\pm 0,5$ °C;
- інтерфейс OneWire;
- робоча напруга 3–5 В.



Рисунок 3.5 – Датчик температури DS18B20 [20]

Для контролю рівня сонячного випромінювання використовується цифровий датчик освітленості GY-302[20] на базі мікросхеми BH1750, зображено на рис. 3.6. Датчик підключається до Arduino Uno за інтерфейсом I2C та забезпечує автоматичне вимірювання освітленості під час кожної точки вимірювання. Отримані значення освітленості в люксах надалі перераховуються в еквівалентні значення інсоляції у Вт/м² за допомогою коефіцієнта перерахунку.

Основні характеристики Benning SUN 2:

- діапазон вимірювання інсоляції 100–1250 Вт/м²;
- вимірювання температури поверхні модуля;
- цифровий дисплей;

- похибка вимірювання інсоляції ± 10 Вт/м².

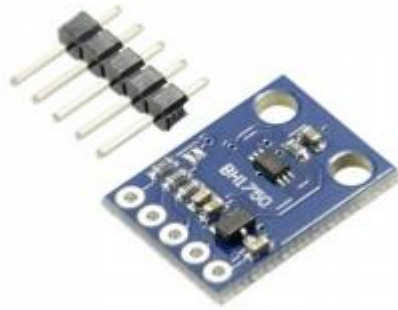


Рисунок 3.6 – Датчик освітленості GY-302 [21]

Для відображення поточної інформації про процес вимірювання використовується LCD-дисплей 16×2 з інтерфейсом I2C, зображено на рис. 3.7. На дисплеї відображаються значення напруги, струму, номер поточної точки, кількість виконаних вимірювань та повідомлення про необхідність переходу до наступного значення напруги. Таким чином, дисплей виконує функцію інтерфейсу взаємодії оператора з системою.



Рисунок 3.7 – LCD-дисплей 16×2 з інтерфейсом I2C [22]

Для автоматичного збереження результатів використовується модуль microSD. Всі результати вимірювань записуються у файл, що дозволяє виключити ручне перенесення даних та значно спрощує подальшу обробку експериментальних результатів.

Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи наведена на рисунку 3.8.

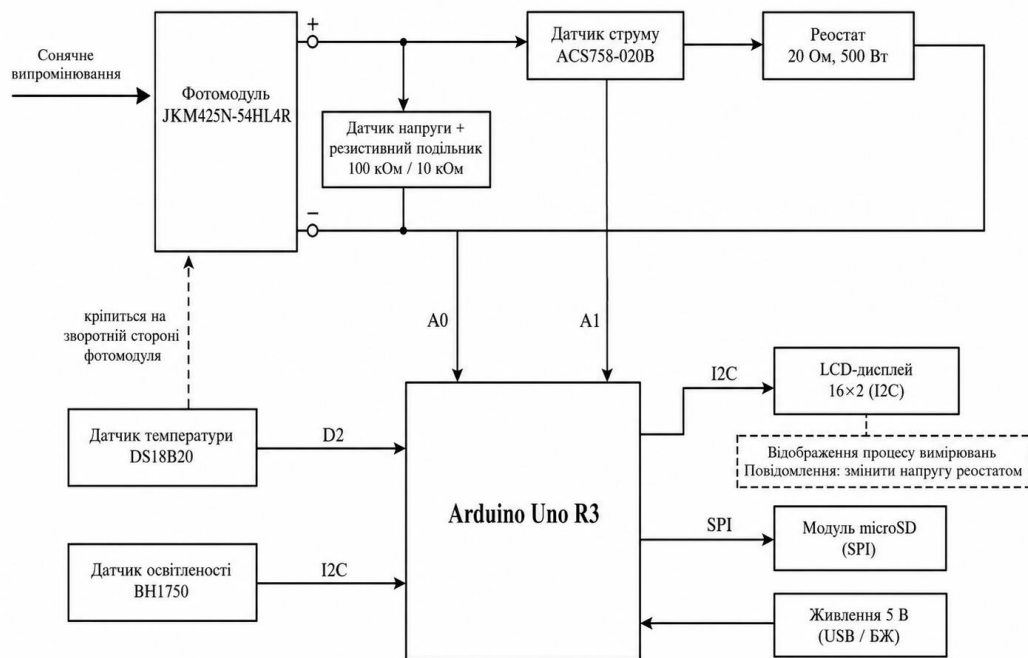


Рисунок 3.8 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи[23]

3.2 Методика проведення вимірювань

Для отримання вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля Jinko Solar JKM425N-54HL4R використовується розроблена інформаційно-вимірювальна система на базі мікроконтролерної плати Arduino Uno R3. Методика вимірювань передбачає автоматизоване зчитування та збереження результатів вимірювань, а також ручне регулювання навантаження за допомогою реостата. Такий підхід дозволяє отримати необхідну кількість експериментальних точок та

забезпечити подальшу побудову вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля.

Перед початком проведення вимірювань фотоелектричний модуль встановлюється під фіксованим кутом нахилу, який протягом усього процесу залишається незмінним. Це дозволяє виключити вплив зміни просторової орієнтації фотомодуля на результати вимірювань та забезпечити коректне порівняння характеристик, отриманих при різних рівнях сонячного випромінювання. Перед початком роботи виконується перевірка працездатності всіх елементів інформаційно-вимірювальної системи та справності силового кола.

Після подачі живлення система виконує ініціалізацію всіх підключених модулів та переходить у режим очікування. На LCD-дисплеї відображається повідомлення про готовність до проведення вимірювань. Після цього оператор встановлює початкове положення повзунка реостата, що відповідає першому значенню напруги, та запускає процес вимірювання.

Зміна навантаження здійснюється вручну за допомогою реостата. Положення повзунка підбирається таким чином, щоб різниця між сусідніми точками становила приблизно 1 В. При цьому фактична кількість точок вимірювання визначається діапазоном зміни напруги фотоелектричного модуля та, як правило, перевищує 25 точок. Збільшення кількості точок дозволяє більш точно відтворити форму вольт-амперної характеристики та підвищити точність визначення точки максимальної потужності.

Після встановлення необхідного значення напруги система автоматично виконує десять послідовних вимірювань струму з інтервалом 1 с. Одночасно контролюється значення напруги, а результати вимірювань записуються на карту пам'яті. Проведення серії з десяти вимірювань для кожної точки дозволяє зменшити вплив випадкових відхилень та підвищити достовірність отриманих результатів.

Середнє значення струму для кожної точки визначається за виразом

$$I_{\text{ср}} = (I_1 + I_2 + \dots + I_{10}) / 10, \quad (3.3)$$

де $I_1 \dots I_{10}$ – результати окремих вимірювань струму, А.

Напруга для кожної точки задається оператором за допомогою реостата та контролюється інформаційно-вимірювальною системою. Оскільки протягом виконання серії вимірювань положення повзунка реостата не змінюється, значення напруги в межах однієї точки вважається сталим. Після завершення серії вимірювань потужність фотоелектричного модуля визначається за формулою

$$P = U \cdot I_{\text{ср}}. \quad (3.4)$$

Крім напруги та струму, для кожної точки вимірювання визначаються температура фотомодуля та рівень сонячного випромінювання. Для цього використовується датчик ВН1750. Вимірювання інсоляції та температури виконуються при кожному переході до нового значення напруги. Отримані значення фіксуються та записуються разом із відповідними значеннями напруги та струму.

Тривалість проведення десяти послідовних вимірювань становить близько 10 с, тому зміна температури фотоелектричного модуля та рівня сонячного випромінювання протягом цього часу є незначною. У зв'язку з цим значення температури та інсоляції для відповідної точки приймаються постійними.

Після завершення десяти вимірювань система виконує запис результатів на карту пам'яті та виводить на дисплей повідомлення про необхідність переходу до наступного значення напруги. Оператор змінює положення повзунка реостата, домагаючись зміни напруги приблизно на 1 В, після чого запускається новий цикл вимірювань.

Для дослідження впливу рівня сонячного випромінювання на параметри фотоелектричного модуля вимірювання проводяться тричі при різних значеннях

інсоляції. Різниця між рівнями сонячного випромінювання повинна бути достатньо великою для забезпечення помітної відмінності між отриманими характеристиками. Усі три серії вимірювань виконуються при однаковому куті нахилу фотомодуля та однаковій послідовності проведення вимірювань.

У результаті кожної серії формується окремий масив даних, який містить значення напруги, струму, потужності, температури та інсоляції для всіх точок вимірювання. Після завершення вимірювань інформаційно-вимірювальна система автоматично виконує визначення точки максимальної потужності шляхом пошуку найбільшого значення потужності серед усіх отриманих точок. Отримані результати зберігаються на карті пам'яті та надалі використовуються для побудови вольт-амперних характеристик, оцінювання похибок вимірювання та аналізу параметрів фотоелектричного модуля.

Таким чином, запропонована методика проведення вимірювань дозволяє отримати достатню кількість експериментальних точок, забезпечує автоматизацію процесу збору та збереження даних, а також створює необхідну основу для подальшого визначення похибок вимірювання та аналізу отриманих характеристик фотоелектричного модуля.

3.2 Алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи

Алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи визначає послідовність дій, які виконує мікроконтролер Arduino Uno R3 під час зчитування, обробки, відображення та збереження вимірювальних даних. Основне призначення алгоритму полягає в тому, щоб забезпечити автоматизований збір інформації про роботу фотоелектричного модуля при заданому значенні навантаження, виконати попередню обробку отриманих даних і сформувати набір результатів, придатний для подальшої побудови вольт-амперної характеристики.

Робота системи починається після подачі живлення на Arduino та всі допоміжні модулі. На першому етапі виконується ініціалізація мікроконтролера,

LCD-дисплея, модуля microSD, датчика температури, аналогових входів для вимірювання напруги та струму, а також змінних, необхідних для виконання розрахунків. У програмі задаються коефіцієнти перерахунку для датчика напруги, датчика струму, кількість вимірювань у межах однієї точки та інтервал між окремими вимірюваннями. Для даної системи інтервал зчитування становить 1 с, а кількість вимірювань для одного встановленого значення напруги дорівнює десяти.

Після ініціалізації система перевіряє готовність модуля microSD до запису даних. Якщо карта пам'яті визначена коректно, створюється або відкривається файл для запису результатів. У файл вноситься заголовок таблиці, у якому передбачаються поля для номера точки, номера вимірювання, значення напруги, струму, температури, інсоляції та розрахованої потужності. Якщо модуль пам'яті не визначається, на дисплей виводиться повідомлення про помилку. Така перевірка необхідна для того, щоб уникнути втрати результатів вимірювання.

Після успішної перевірки пам'яті система переходить у режим готовності. На LCD-дисплеї відображається повідомлення про те, що система готова до початку вимірювання. На цьому етапі оператор встановлює необхідне значення напруги за допомогою реостата. Arduino не керує реостатом автоматично, а лише контролює вимірювані параметри та повідомляє оператору про завершення вимірювання для поточної точки.

Основний цикл роботи системи починається після того, як встановлено потрібне значення напруги. Мікроконтролер зчитує сигнал з датчика напруги, який реалізований на основі резистивного подільника. Аналоговий сигнал надходить на вхід Arduino, після чого перетворюється в цифрове значення за допомогою 10-розрядного аналого-цифрового перетворювача. Оскільки на аналоговий вхід подається не повна напруга фотоелектричного модуля, а зменшене значення після подільника, у програмі виконується перерахунок напруги з урахуванням коефіцієнта поділу.

Після зчитування напруги виконується зчитування струму. Для цього використовується датчик струму ACS758-020B, вихідний аналоговий сигнал якого також подається на один із аналогових входів Arduino. Значення АЦП перераховується у напругу на виході датчика, а потім у силу струму з урахуванням чутливості датчика та його нульового зміщення. Такий підхід дозволяє отримувати значення струму без ручного зняття показів та безпосередньо використовувати їх у подальших розрахунках.

Окрім напруги та струму, система передбачає фіксацію температури фотоелектричного модуля та рівня інсоляції. Температура зчитується з датчика DS18B20, встановленого на тильній стороні фотомодуля. Значення інсоляції визначається за допомогою приладу Benning SUN 2 та вноситься до відповідного поля даних. Ці параметри потрібні для подальшого аналізу результатів, оскільки температура та сонячне випромінювання безпосередньо впливають на форму вольт-амперної характеристики.

Для одного встановленого значення напруги система виконує десять послідовних вимірювань. Після кожного вимірювання отримані значення записуються у файл на microSD-карті. Записуються первинні результати, тобто окремі значення струму для кожного з десяти вимірювань, а також відповідне значення напруги. Такий спосіб збереження дозволяє надалі перевірити стабільність показів у межах однієї точки та використати дані для оцінювання похибок.

Після кожного вимірювання Arduino витримує паузу 1 с, після чого виконує наступне зчитування. Інтервал у 1 с забезпечує однакову дискретність вимірювання та дає можливість уникнути надто швидкого накопичення випадкових значень. Оскільки реостат у межах однієї точки не змінюється, напруга вважається сталою, а основною величиною, для якої виконується усереднення, є струм.

Після завершення десяти вимірювань мікроконтролер обчислює середнє значення струму для поточної точки. Середнє значення визначається як сума

десяти вимірних значень струму, поділена на їх кількість. Це дозволяє зменшити вплив випадкових відхилень, які можуть виникати через шум датчика, незначні коливання сигналу або особливості аналого-цифрового перетворення.

Після визначення середнього струму система розраховує потужність фотоелектричного модуля для поточної точки. Потужність визначається як добуток напруги та середнього значення струму(3.4).

Отримане значення потужності записується у підсумковий рядок файлу. У цьому рядку зазначаються номер точки, напруга, середній струм, потужність, температура та інсоляція. Такий формат запису дозволяє без додаткової ручної обробки перенести результати у табличний процесор та побудувати необхідні графічні залежності.

Однією з функцій алгоритму є автоматичне визначення точки максимальної потужності. Після розрахунку потужності для поточної точки Arduino порівнює отримане значення з найбільшим значенням потужності, збереженим раніше. Якщо поточна потужність більша за попередню максимальну, система оновлює значення максимальної потужності та запам'ятовує відповідні значення напруги й струму. Таким способом у процесі вимірювання поступово визначається точка максимальної потужності фотоелектричного модуля.

Після завершення обробки поточної точки на LCD-дисплей виводиться повідомлення про необхідність зміни положення реостата. Це повідомлення є сигналом для оператора, що вимірювання для поточного значення напруги завершено. Оператор змінює положення повзунка реостата, встановлюючи наступне значення напруги. Після стабілізації показів система знову виконує цикл з десяти вимірювань.

LCD-дисплей у даній системі виконує роль простого інтерфейсу взаємодії між мікроконтролером та оператором. На нього можуть виводитися поточне значення напруги, значення струму, номер вимірювання в межах поточної точки, а також службові повідомлення. Зокрема, після завершення десяти вимірювань на дисплеї виводиться повідомлення про перехід до наступної точки. Завдяки цьому

оператор не повинен самотійно відраховувати кількість вимірювань або контролювати час між ними.

Робота алгоритму побудована таким чином, що кількість запусків системи або кількість проведених серій вимірювань не впливає на його внутрішню логіку. Алгоритм завжди виконує однакову послідовність дій: зчитування даних, накопичення десяти вимірювань, розрахунок середнього значення, визначення потужності, запис результатів, перевірка максимальної потужності та повідомлення оператору про зміну напруги. Завдяки цьому система є універсальною та може застосовуватися для різної кількості вимірювальних серій.

У загальному вигляді алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи складається з таких етапів:

1. Подача живлення на систему.
2. Ініціалізація Arduino, LCD-дисплея, датчиків та модуля microSD.
3. Перевірка готовності карти пам'яті до запису.
4. Виведення повідомлення про готовність системи.
5. Очікування встановлення оператором необхідного значення напруги.
6. Зчитування значення напруги фотоелектричного модуля.
7. Зчитування значення струму.
8. Зчитування температури та фіксація інсоляції.
9. Запис поточного вимірювання на карту пам'яті.
10. Повторення вимірювання з інтервалом 1 с до досягнення десяти вимірювань.
11. Обчислення середнього значення струму.
12. Розрахунок потужності для поточної точки.
13. Порівняння потужності з попереднім максимальним значенням.
14. Збереження підсумкового результату для поточної точки.
15. Виведення повідомлення про необхідність зміни напруги.
16. Перехід до наступної точки вимірювання.

Для наочного подання послідовності роботи системи передбачається побудова блок-схеми алгоритму, на якій будуть відображені основні етапи роботи

мікроконтролера: ініціалізація, зчитування даних, накопичення десяти вимірювань, обчислення середнього значення струму, розрахунок потужності, збереження даних та перевірка точки максимальної потужності.

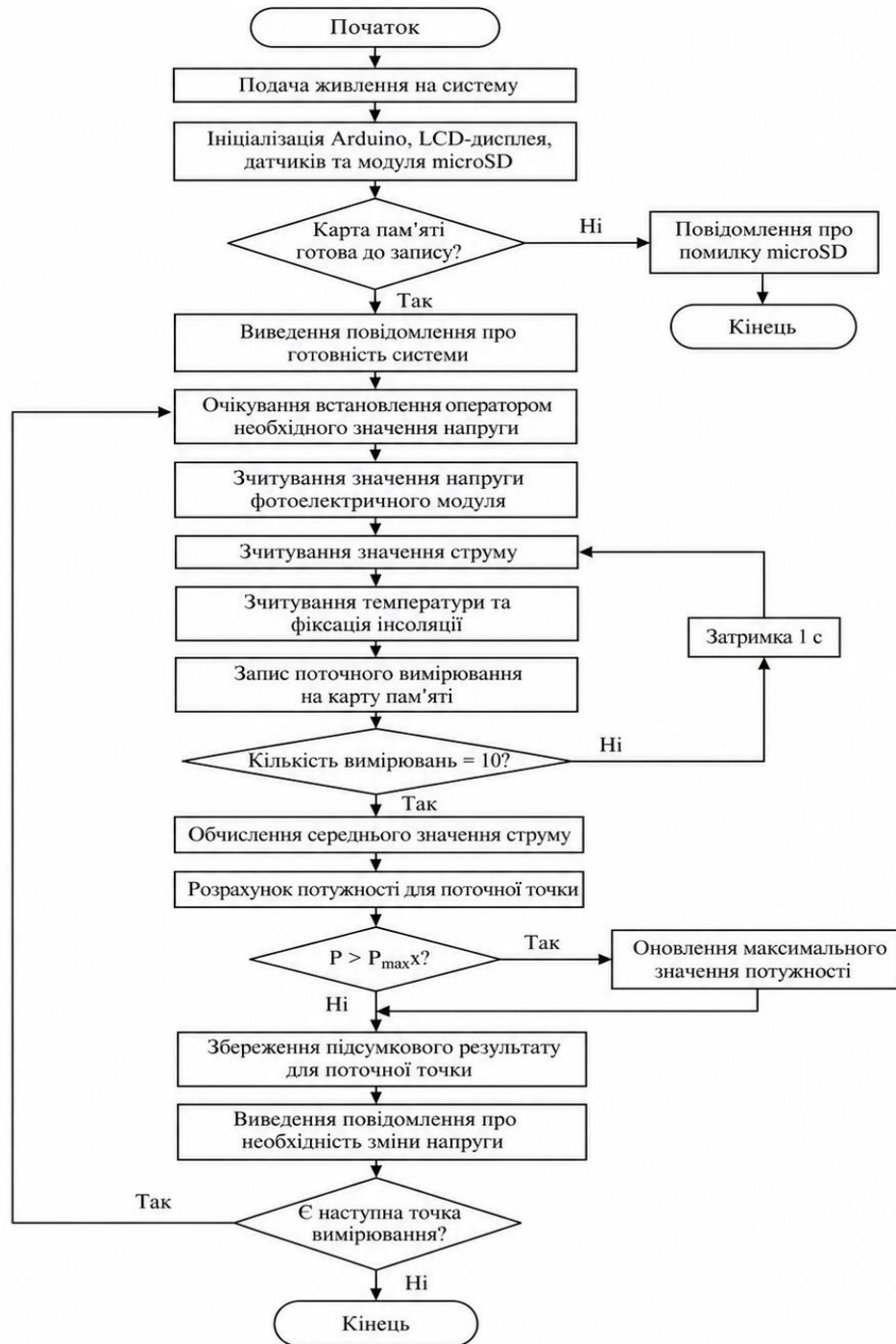


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної системи[23]

Запропонований алгоритм забезпечує впорядковану роботу інформаційно-вимірювальної системи та дозволяє виконувати вимірювання без ручного запису результатів. Основні дії, пов'язані з обробкою даних, виконуються автоматично, тоді як оператор бере участь лише у зміні положення повзунка реостата. Це робить систему простою в реалізації, але достатньо функціональною для отримання даних, необхідних для побудови вольт-амперної характеристики та визначення точки максимальної потужності фотоелектричного модуля.

3.3 Методика проведення вимірювань

Після підготовки інформаційно-вимірювальної системи до роботи та перевірки працездатності її складових елементів проводяться вимірювання параметрів фотоелектричного модуля Jinko Solar JKM425N-54HL4R. Метою проведення вимірювань є отримання достатньої кількості експериментальних даних для побудови вольт-амперних характеристик та визначення основних параметрів фотоелектричного модуля при різних рівнях сонячного випромінювання.

Перед початком вимірювань фотоелектричний модуль встановлюється на відкритій ділянці таким чином, щоб у процесі роботи виключити можливість часткового затінення його поверхні. Наявність навіть незначного затінення окремих елементів фотомодуля може призвести до зміни форми вольт-амперної характеристики та зменшення потужності, тому під час проведення вимірювань необхідно забезпечити рівномірне освітлення всієї поверхні модуля.

Кут нахилу фотомодуля вибирається до початку вимірювань та надалі не змінюється. Незмінність просторового положення модуля дозволяє забезпечити однакові умови проведення всіх вимірювань та виключити вплив орієнтації фотоелектричної панелі на результати дослідження. Після встановлення фотомодуля перевіряється надійність електричних з'єднань, правильність

підключення вимірювальних датчиків та справність інформаційно-вимірювальної системи.

Після подачі живлення та завершення процедури ініціалізації на LCD-дисплеї відображається повідомлення про готовність системи до роботи. Оператор встановлює початкове положення повзунка реостата, створюючи необхідне навантаження на фотоелектричний модуль. Подальша зміна режимів роботи модуля виконується шляхом зміни опору реостата. При цьому значення напруги змінюються поступово з кроком близько 1 В, що дозволяє отримати достатню кількість точок для побудови вольт-амперної характеристики.

Вимірювання починаються з області малих значень напруги, які відповідають режиму, близькому до короткого замикання. У цьому режимі струм фотоелектричного модуля має найбільше значення. Надалі опір реостата поступово збільшується, унаслідок чого напруга на виході фотоелектричного модуля зростає, а струм поступово зменшується. Вимірювання продовжуються до області, близької до режиму холостого ходу, при якому напруга досягає максимального значення, а струм наближається до нуля.

Для кожного встановленого значення напруги інформаційно-вимірювальна система виконує десять послідовних вимірювань струму з інтервалом 1 с. Протягом виконання серії вимірювань положення повзунка реостата залишається незмінним, тому значення напруги для поточної точки вважається сталим. Отримані значення струму автоматично записуються на карту пам'яті та надалі використовуються для визначення середнього значення струму. Визначення середнього значення виконується відповідно до виразу, наведеного в підрозділі 3.5.

Окрім вимірювання напруги та струму, для кожної точки вимірювання додатково визначаються температура фотоелектричного модуля та рівень сонячного випромінювання. Вимірювання цих параметрів виконуються при кожній зміні положення повзунка реостата, тобто перед початком чергової серії з десяти вимірювань струму. Для визначення температури поверхні

фотоелектричного модуля та рівня інсоляції використовується датчик освітленості. Отримані значення температури та інсоляції зчитуються інформаційно-вимірювальною системою та записуються разом із відповідними значеннями напруги і струму.

Оскільки протягом виконання десяти послідовних вимірювань положення реостата не змінюється, а загальна тривалість одного циклу становить близько 10 с, зміна температури фотомодуля та інтенсивності сонячного випромінювання за цей час є незначною. Тому значення температури та інсоляції, отримані на початку поточної точки, приймаються постійними для всіх десяти вимірювань струму. Після завершення серії вимірювань та переходу до наступного значення напруги температура фотомодуля та рівень сонячного випромінювання визначаються повторно, після чого нові значення також зберігаються у пам'яті системи.

Після завершення десяти вимірювань система автоматично повідомляє оператора про необхідність переходу до наступного значення напруги. Оператор змінює положення повзунка реостата до досягнення нового значення напруги, після чого запускається наступний цикл вимірювань. Така послідовність дій повторюється до проходження всього робочого діапазону напруг фотоелектричного модуля.

Для оцінювання впливу рівня сонячного випромінювання на характеристики фотоелектричного модуля проводяться три незалежні серії вимірювань. Кожна серія виконується за однаковою методикою, однак при різних рівнях інсоляції. Різниця між рівнями сонячного випромінювання повинна бути достатньо великою для того, щоб отримані характеристики мали помітні відмінності. Проведення декількох серій вимірювань дозволяє оцінити вплив інсоляції на струм короткого замикання, положення точки максимальної потужності та форму вольт-амперної характеристики.

У процесі роботи всі результати автоматично записуються на карту пам'яті. Для кожної точки вимірювання зберігаються значення напруги, десять

послідовних вимірювань струму, середнє значення струму, температура фотоелектричного модуля, рівень інсоляції та розраховане значення потужності. Такий формат збереження даних дозволяє не тільки побудувати вольт-амперні характеристики, але й проаналізувати вплив температури та рівня сонячного випромінювання на параметри фотоелектричного модуля.

Після завершення вимірювань результати переносяться на персональний комп'ютер для подальшої обробки. На основі отриманих даних визначаються середні значення струму, обчислюється потужність відповідно до виразу (1.1), будуються вольт-амперні характеристики та залежності потужності від напруги. Також визначаються основні параметри фотоелектричного модуля, зокрема струм короткого замикання, напруга холостого ходу, напруга та струм у точці максимальної потужності, а також максимальна потужність.

Під час обробки результатів кожна серія вимірювань розглядається окремо, що дозволяє надалі виконати порівняння характеристик, отриманих при різних рівнях інсоляції. Запропонована методика поєднує ручне регулювання навантаження та автоматизований збір даних, що дозволяє зменшити вплив людського фактора та забезпечити однаковий порядок проведення вимірювань для всіх точок вольт-амперної характеристики.

3.4 Результати вимірювань та побудова вольт-амперних характеристик

Після завершення проведення вимірювань та перенесення результатів з карти пам'яті інформаційно-вимірювальної системи на персональний комп'ютер було виконано їх подальшу обробку. Усі отримані дані були розподілені на три серії відповідно до рівня сонячного випромінювання під час проведення вимірювань. Для кожної серії були сформовані окремі таблиці результатів, які містять значення напруги фотоелектричного модуля, рівня інсоляції, температури поверхні модуля, десяти послідовних вимірювань струму, середнього значення струму та розрахованого значення потужності.

Наявність усіх первинних результатів вимірювань дозволяє виконати подальший аналіз характеристик фотоелектричного модуля, а також забезпечує можливість оцінювання похибок вимірювань та порівняння отриманих результатів із паспортними параметрами фотоелектричного модуля JKM425N-54HL4R.

Перша серія вимірювань була проведена при високому рівні сонячного випромінювання. Значення інсоляції протягом вимірювань змінювалися в межах від 941 до 954 Вт/м², а температура поверхні фотоелектричного модуля становила від 49 до 49,6 °С. Під час проведення вимірювань було отримано 37 точок вольт-амперної характеристики, що дозволило достатньо детально описати роботу фотоелектричного модуля в усьому робочому діапазоні напруг.

Результати першої серії вимірювань наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань при високому рівні інсоляції

U, В	G, Вт/м ²	T, °С	I _{сер} , А	P, Вт
1	949	49,4	13,03	13,03
2	953	49,4	13,03	26,05
3	950	49,3	13,02	39,05
4	948	49,2	13,01	52,05
5	952	49,2	13,00	64,99
6	954	49,2	12,99	77,93
7	951	49,1	12,98	90,84
8	947	49,1	12,96	103,70
9	950	49	12,95	116,53
10	946	49,1	12,93	129,28
11	948	49	12,91	141,99
12	951	49,1	12,89	154,66
13	949	49,2	12,86	167,21
14	945	49,1	12,83	179,59
15	947	49,2	12,79	191,88
16	950	49,2	12,75	203,97
17	948	49,3	12,70	215,87
18	944	49,2	12,64	227,48
19	946	49,3	12,57	238,79
20	949	49,4	12,49	249,76
21	947	49,3	12,40	260,36
22	945	49,4	12,30	270,56
23	948	49,4	12,18	280,09

Продовження таблиці 3.1

24	950	49,5	12,04	288,91
25	946	49,4	11,88	296,95
26	944	49,5	11,69	303,89
27	947	49,5	11,46	309,37
28	949	49,6	11,18	312,98
29	945	49,5	10,82	313,72
30	943	49,5	10,35	310,44
31	946	49,4	9,72	301,26
32	948	49,4	8,88	284,10
33	944	49,3	7,76	256,01
34	942	49,3	6,25	212,43
35	945	49,2	4,22	147,63
36	943	49,2	1,52	54,65
37	941	49,1	0,08	2,92

Друга серія вимірювань проводилася при середньому рівні сонячного випромінювання. Значення інсоляції змінювалися в межах від 705 до 722 Вт/м², а температура поверхні фотоелектричного модуля перебувала в діапазоні від 41,5 до 42,2 °С. Як і в першій серії, було отримано достатню кількість точок для побудови вольт-амперної характеристики та визначення основних параметрів фотоелектричного модуля.

Результати другої серії вимірювань наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювань при середньому рівні інсоляції

U, В	G, Вт/м²	T, °C	I_{сер}, А	P, Вт
1	719	41,8	9,90	9,90
2	722	41,9	9,89	19,78
3	720	42	9,87	29,62
4	718	41,9	9,86	39,45
5	716	41,9	9,84	49,21
6	719	42	9,82	58,93
7	721	42,1	9,81	68,68
8	717	42	9,78	78,26
9	715	41,9	9,76	87,86
10	718	42	9,73	97,32
11	720	42,1	9,70	106,72
12	716	42	9,66	115,94

Продовження таблиці 3.2

13	714	42	9,62	125,09
14	717	42,1	9,57	134,01
15	719	42,2	9,52	142,83
16	715	42,1	9,46	151,39
17	713	42	9,39	159,66
18	716	42,1	9,32	167,80
19	714	42,2	9,24	175,60
20	712	42,1	9,15	183,04
21	715	42	9,04	189,88
22	717	42,1	8,92	196,28
23	713	42	8,77	201,76
24	711	41,9	8,59	206,21
25	714	42	8,37	209,30
26	716	42	8,09	210,39
27	712	41,9	7,73	208,76
28	710	41,8	7,27	203,62
29	713	41,9	6,69	194,07
30	711	41,8	5,94	178,26
31	708	41,7	4,97	154,13
32	710	41,7	3,71	118,78
33	707	41,6	2,09	69,04
34	705	41,5	0,33	11,29

Третя серія вимірювань проводилася при нижчому рівні сонячного випромінювання. Значення інсоляції під час вимірювань змінювалися в межах від 512 до 523 Вт/м², а температура фотоелектричного модуля становила від 35,9 до 36,5 °С. Зменшення рівня сонячного випромінювання призвело до зниження струму фотоелектричного модуля та зменшення максимальної потужності, однак характер зміни вольт-амперної характеристики залишився аналогічним попереднім серіям.

Результати третьої серії вимірювань наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювань при низькому рівні інсоляції

U, В	G, Вт/м ²	T, °С	I _{сеп} , А	P, Вт
1	521	36,1	7,16	7,16
2	519	36,3	7,15	14,30
3	516	36	7,13	21,40

Продовження таблиці 3.3

4	520	36,2	7,11	28,45
5	523	36,4	7,09	35,46
6	521	36,1	7,06	42,37
7	518	36,3	7,03	49,22
8	516	36,2	6,99	55,94
9	519	36,5	6,95	62,57
10	522	36,1	6,90	69,02
11	520	35,9	6,84	75,26
12	517	36,3	6,77	81,26
13	520	36,2	6,69	87,00
14	523	36,4	6,60	92,43
15	521	36	6,49	97,38
16	518	36,2	6,36	101,79
17	516	36,5	6,20	105,43
18	519	36,1	6,01	108,22
19	522	36,3	5,78	109,86
20	520	36,2	5,50	110,04
21	517	36,4	5,16	108,40
22	514	36	4,75	104,54
23	516	36,2	4,27	98,26
24	519	36,5	3,69	88,61
25	517	36,1	3,00	75,05
26	514	36,3	2,19	56,99
27	512	36	1,27	34,34
28	515	36,2	0,25	7,06

На основі отриманих результатів були побудовані вольт-амперні характеристики для трьох рівнів інсоляції. Побудова графіків виконувалася за середніми значеннями струму, отриманими для кожного значення напруги. Отримані залежності дозволяють оцінити зміну струму фотоелектричного модуля в усьому діапазоні напруг та визначити характер впливу сонячного випромінювання на форму вольт-амперної характеристики.

Вольт-амперна характеристика для першої серії вимірювань наведена на рисунку 3.10.

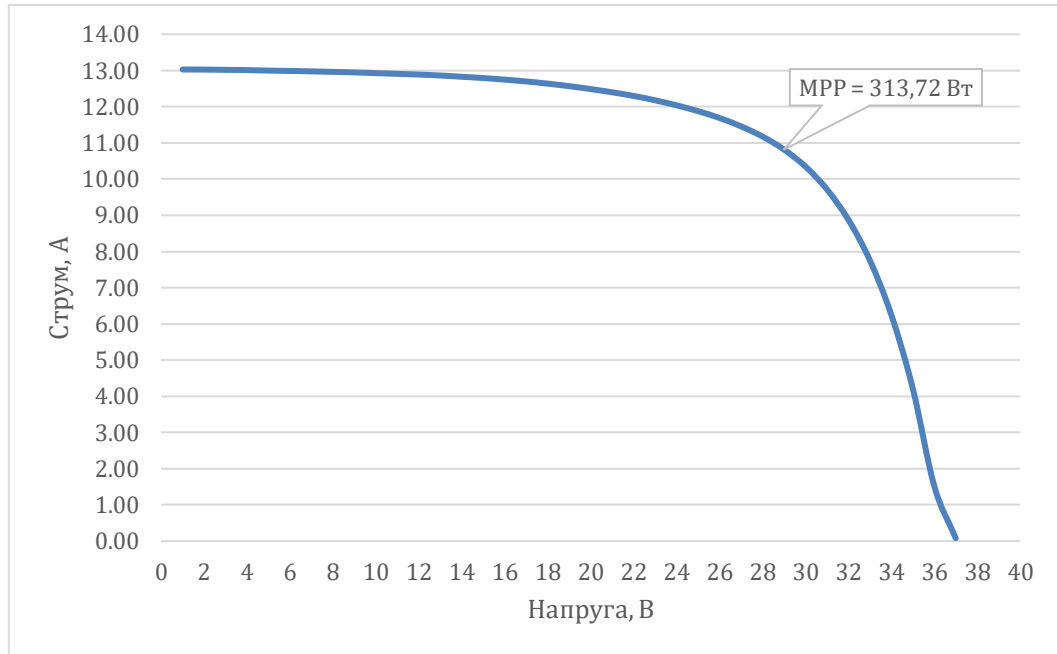


Рисунок 3.10 – Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля при високому рівні інсоляції

Вольт-амперна характеристика для другої серії вимірювань наведена на рисунку 3.11.

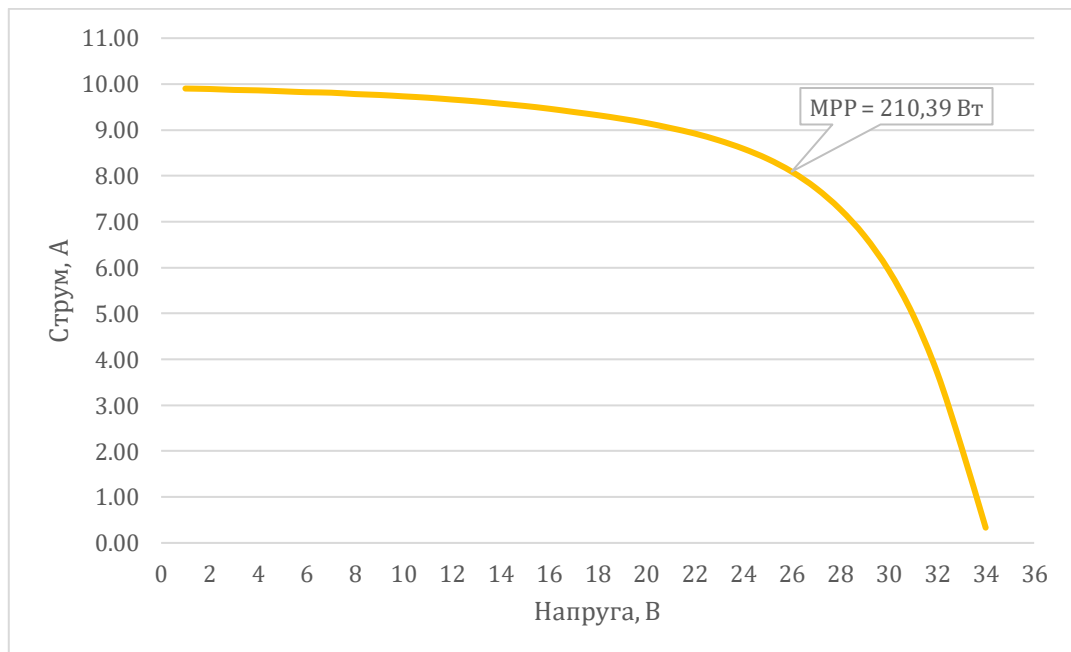


Рисунок 3.11 – Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля при середньому рівні інсоляції

Вольт-амперна характеристика для третьої серії вимірювань наведена на рисунку 3.12.

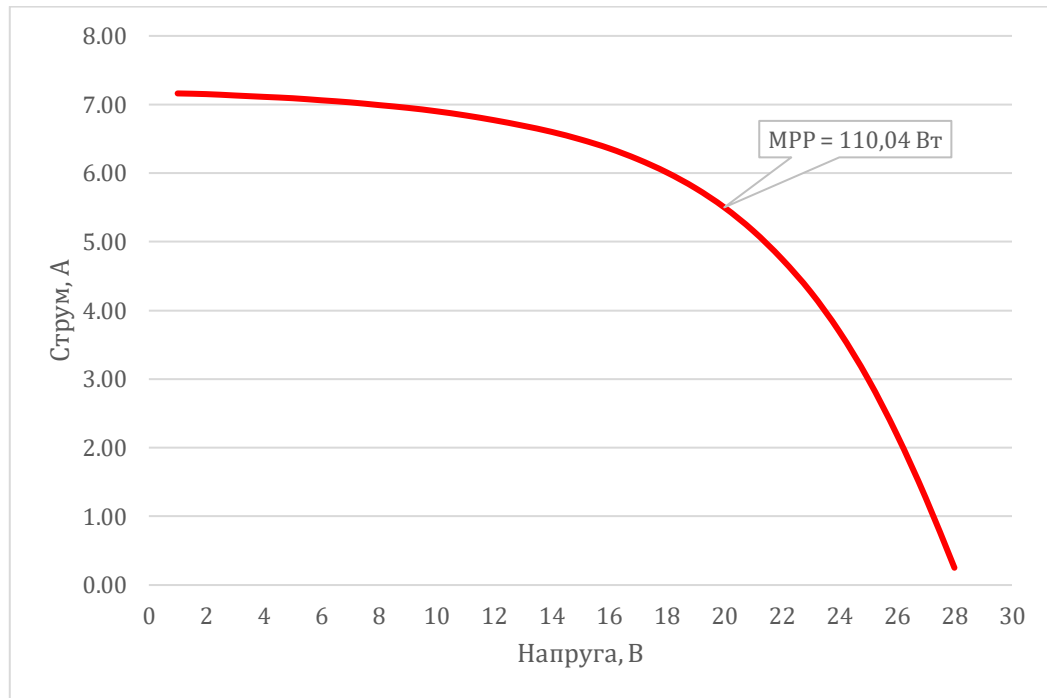


Рисунок 3.12 – Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля при низькому рівні інсоляції

Отримані графіки демонструють характерну для фотоелектричних модулів форму вольт-амперної характеристики. При малих значеннях напруги струм залишається майже сталим, а при наближенні до напруги холостого ходу відбувається його різке зменшення. При зменшенні рівня інсоляції спостерігається відповідне зменшення струму короткого замикання, тоді як напруга холостого ходу змінюється меншою мірою.

Крім вольт-амперних характеристик були побудовані залежності потужності від напруги.

Залежність потужності від напруги для першої серії вимірювань наведена на рисунку 3.13.

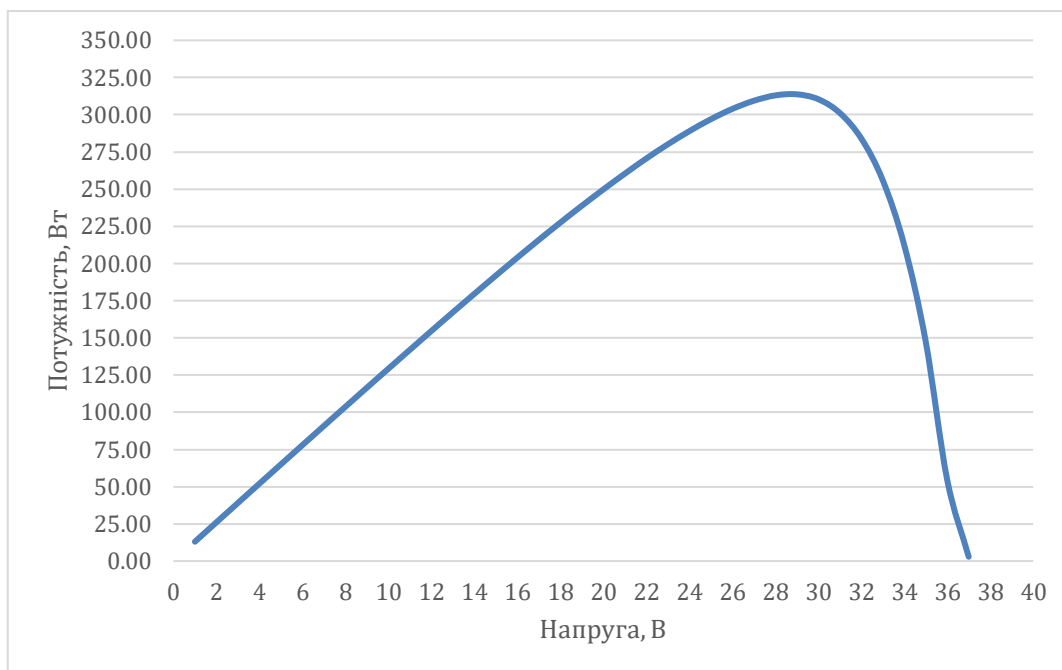


Рисунок 3.13 – Залежність потужності від напруги при високому рівні інсоляції

Залежність потужності від напруги для другої серії вимірювань наведена на рисунку 3.14.

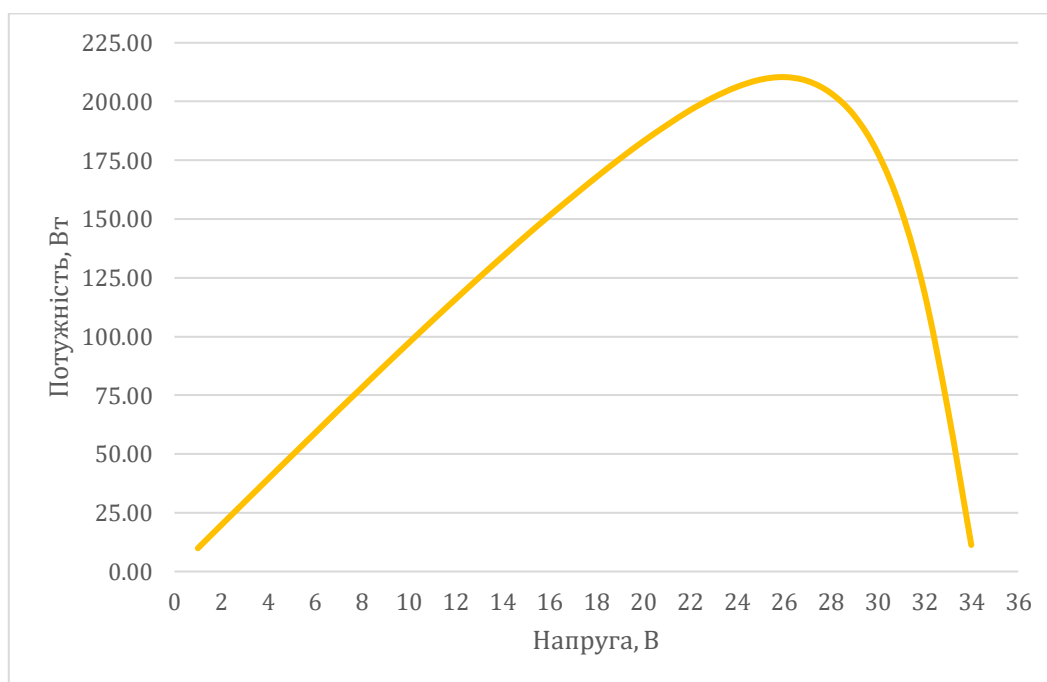


Рисунок 3.14 – Залежність потужності від напруги при середньому рівні інсоляції

Залежність потужності від напруги для третьої серії вимірювань наведена на рисунку 3.15.

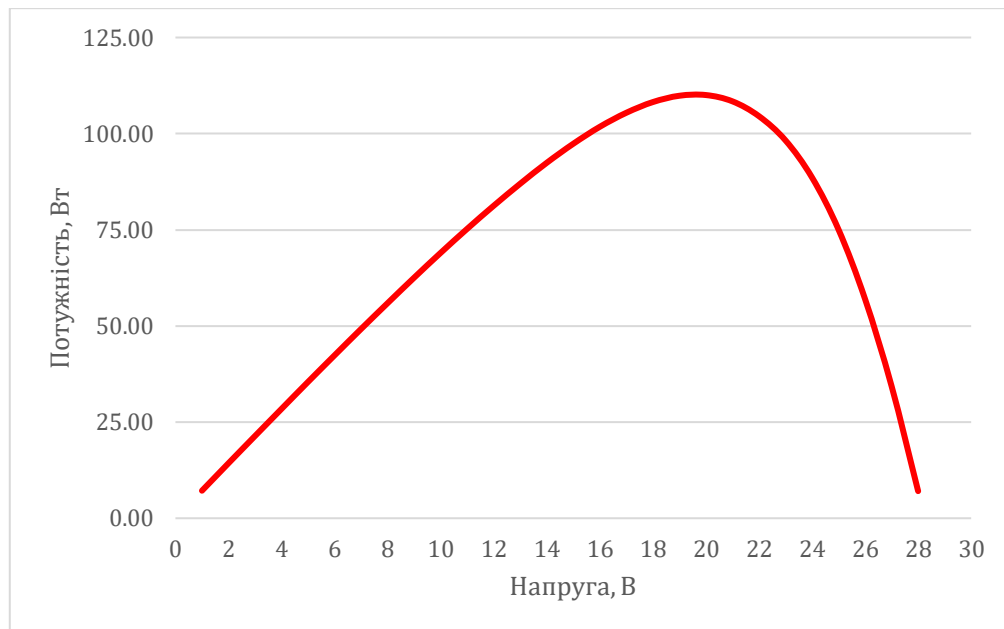


Рисунок 3.15 – Залежність потужності від напруги при низькому рівні інсоляції

За результатами побудови характеристик були визначені основні параметри фотоелектричного модуля для кожної серії вимірювань. Визначено струм короткого замикання, напругу холостого ходу, напругу та струм у точці максимальної потужності, а також максимальну потужність фотоелектричного модуля.

Результати визначення основних параметрів наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні параметри фотоелектричного модуля за результатами вимірювань

№ серії	Середня інсоляція, Вт/м ²	Середня температура, °C	I _{кз} , А	U _{хх} , В	U _{мп} , В	I _{мп} , А	P _{max} , Вт
1	948	49,28	13,03	37	29	10,82	313,72
2	715	41,95	9,90	34	26	8,09	210,39
3	518	36,21	7,16	28	20	5,5	110,04

Аналіз отриманих результатів показує, що зі зменшенням рівня сонячного випромінювання відбувається пропорційне зменшення струму короткого замикання та максимальної потужності фотоелектричного модуля. Для першої серії вимірювань при середній інсоляції 948 Вт/м^2 максимальна потужність становила $313,8 \text{ Вт}$. Для другої серії при середній інсоляції 715 Вт/м^2 максимальна потужність зменшилася до $210,3 \text{ Вт}$, а для третьої серії при середній інсоляції 518 Вт/м^2 максимальна потужність становила $110,0 \text{ Вт}$. При цьому зміна напруги холостого ходу є значно меншою, ніж зміна струму короткого замикання, що відповідає характерним особливостям роботи кремнієвих фотоелектричних модулів.

Отримані результати використовуються для подальшого оцінювання похибок вимірювання та аналізу відповідності експериментальних характеристик паспортним параметрам фотоелектричного модуля JKM425N-54HL4R.

3.5 Оцінювання похибок вимірювання

Під час проведення вимірювань параметрів фотоелектричного модуля отримані результати не можуть вважатися абсолютно точними, оскільки на них впливають похибки вимірювання, пов'язані як із характеристиками вимірювальних елементів, так і з випадковими відхиленнями результатів. Тому для оцінювання достовірності отриманих даних необхідно визначити похибки вимірювання основних електричних величин та похибку визначення потужності фотоелектричного модуля.

У даній роботі напруга та струм відносяться до прямих вимірювань, оскільки вони безпосередньо визначаються інформаційно-вимірювальною системою. Потужність фотоелектричного модуля є величиною непрямого вимірювання, оскільки її значення визначається на основі результатів вимірювання напруги та струму відповідно до виразу (1.1).

Для кожного значення напруги виконувалося десять послідовних вимірювань струму, що дозволяє визначити середнє значення струму та оцінити випадкову складову похибки. Середнє значення вимірюваної величини визначається за формулою 3.3.

Випадкова абсолютна похибка визначається за виразом[15]

$$\Delta I_{\text{вип}} = \sqrt{\frac{(I_1 - I_{\text{сеп}})^2 + (I_2 - I_{\text{сеп}})^2 + \dots + (I_N - I_{\text{сеп}})^2}{N}}, \quad 3.7$$

де $\Delta I_{\text{вип}}$ – випадкова абсолютна похибка струму, А.

Крім випадкової похибки, необхідно враховувати систематичну (інструментальну) похибку вимірювальних каналів. Інструментальна похибка визначається точністю датчиків, елементів вимірювального кола та особливостями їх калібрування.

Оскільки похибка вимірювання струму складається із випадкової та інструментальної складових, сумарна абсолютна похибка струму визначається за формулою[15]

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_{\text{вип}}^2 + \Delta I_{\text{інстр}}^2}, \quad 3.10$$

де ΔI – сумарна абсолютна похибка вимірювання струму, А.

Відносна похибка вимірювання напруги визначається за виразом[15]

$$\varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\%, \quad 3.11$$

]

де ε_U – відносна похибка вимірювання напруги, %.

Відносна похибка вимірювання струму визначається за формулою[15]

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I_{\text{сер}}} \cdot 100\%, \quad 3.12$$

де ε_I – відносна похибка вимірювання струму, %.

Оскільки потужність фотоелектричного модуля є величиною непрямого вимірювання, її похибка визначається через похибки напруги та струму. Для функції добутку двох величин відносна похибка визначається як сума відносних похибок окремих величин[15]

$$\varepsilon_P = \varepsilon_U + \varepsilon_I, \quad 3.13$$

де ε_P – відносна похибка визначення потужності, %.

Абсолютна похибка потужності визначається за формулою[15]

$$\Delta P = \frac{\varepsilon_P \cdot P}{100}, \quad 3.14$$

де ΔP – абсолютна похибка визначення потужності, Вт.

Таким чином, результат визначення потужності записується у вигляді[15]

$$P = P_{\text{сер}} \pm \Delta P. \quad 3.15$$

Розрахунок похибок був виконаний для кожної серії вимірювань окремо. При цьому для кожного значення напруги визначалися середнє значення струму, випадкова похибка, сумарна абсолютна похибка струму, відносні похибки вимірювання напруги та струму, а також похибка непрямого визначення потужності.

Результати розрахунків похибок для першої серії вимірювань наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати оцінювання похибок для першої серії вимірювань

U, В	I _{сер} , А	P, Вт	ΔI _{вип} , А	ΔU _{інстр} , В	ΔI _{інстр} , А	ΔI, А	ε _U , %	ε _I , %	ε _P , %	ΔP, Вт
1	13,03	13,03	0,0125	0,01	0,195	0,1958	1	1,50	2,50	0,326
2	13,03	26,05	0,0143	0,02	0,195	0,1959	1	1,50	2,50	0,652
3	13,02	39,05	0,0125	0,03	0,195	0,1957	1	1,50	2,50	0,978
4	13,01	52,05	0,0125	0,04	0,195	0,1956	1	1,50	2,50	1,303
5	13,00	64,99	0,0125	0,05	0,195	0,1954	1	1,50	2,50	1,627
6	12,99	77,93	0,0125	0,06	0,195	0,1952	1	1,50	2,50	1,951
7	12,98	90,84	0,0110	0,07	0,195	0,1950	1	1,50	2,50	2,273
8	12,96	103,70	0,0110	0,08	0,194	0,1948	1	1,50	2,50	2,595
9	12,95	116,53	0,0125	0,09	0,194	0,1946	1	1,50	2,50	2,917
10	12,93	129,28	0,0125	0,10	0,194	0,1943	1	1,50	2,50	3,236
11	12,91	141,99	0,0125	0,11	0,194	0,1940	1	1,50	2,50	3,554
12	12,89	154,66	0,0125	0,12	0,193	0,1937	1	1,50	2,50	3,871
13	12,86	167,21	0,0125	0,13	0,193	0,1933	1	1,50	2,50	4,185
14	12,83	179,59	0,0125	0,14	0,192	0,1928	1	1,50	2,50	4,495
15	12,79	191,88	0,0125	0,15	0,192	0,1923	1	1,50	2,50	4,803
16	12,75	203,97	0,0125	0,16	0,191	0,1916	1	1,50	2,50	5,106
17	12,70	215,87	0,0125	0,17	0,190	0,1909	1	1,50	2,50	5,404
18	12,64	227,48	0,0125	0,18	0,190	0,1900	1	1,50	2,50	5,694
19	12,57	238,79	0,0125	0,19	0,189	0,1889	1	1,50	2,50	5,978
20	12,49	249,76	0,0125	0,20	0,187	0,1877	1	1,50	2,50	6,252
21	12,40	260,36	0,0125	0,21	0,186	0,1864	1	1,50	2,50	6,518
22	12,30	270,56	0,0125	0,22	0,184	0,1849	1	1,50	2,50	6,773
23	12,18	280,09	0,0125	0,23	0,183	0,1831	1	1,50	2,50	7,012
24	12,04	288,91	0,0125	0,24	0,181	0,1810	1	1,50	2,50	7,233
25	11,88	296,95	0,0125	0,25	0,178	0,1786	1	1,50	2,50	7,435
26	11,69	303,89	0,0125	0,26	0,175	0,1758	1	1,50	2,50	7,609
27	11,46	309,37	0,0125	0,27	0,172	0,1723	1	1,50	2,50	7,746
28	11,18	312,98	0,0125	0,28	0,168	0,1681	1	1,50	2,50	7,838
29	10,82	313,72	0,0125	0,29	0,162	0,1627	1	1,50	2,50	7,857
30	10,35	310,44	0,0125	0,30	0,155	0,1557	1	1,50	2,50	7,776
31	9,72	301,26	0,0125	0,31	0,146	0,1463	1	1,51	2,51	7,548
32	8,88	284,10	0,0125	0,32	0,133	0,1338	1	1,51	2,51	7,121
33	7,76	256,01	0,0125	0,33	0,116	0,1170	1	1,51	2,51	6,422
34	6,25	212,43	0,0125	0,34	0,094	0,0945	1	1,51	2,51	5,339
35	4,22	147,63	0,0125	0,35	0,063	0,0645	1	1,53	2,53	3,733
36	1,52	54,65	0,0125	0,36	0,023	0,0260	1	1,71	2,71	1,481
37	0,08	2,92	0,0070	0,37	0,001	0,0071	1	8,99	9,99	0,292

Аналогічні розрахунки були виконані для другої серії вимірювань. Отримані результати наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати оцінювання похибок для другої серії вимірювань

U, В	Iсер, А	P, Вт	$\Delta I_{\text{вип}},$ А	$\Delta U_{\text{інстр}},$ В	$\Delta I_{\text{інстр}},$ А	$\Delta I, А$	$\epsilon U, \%$	$\epsilon I, \%$	$\epsilon P, \%$	$\Delta P, Вт$
1	9,90	9,90	0,01	0,01	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	0,25
2	9,89	19,78	0,01	0,02	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	0,50
3	9,87	29,62	0,01	0,03	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	0,74
4	9,86	39,45	0,01	0,04	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	0,99
5	9,84	49,21	0,01	0,05	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	1,23
6	9,82	58,93	0,01	0,06	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	1,48
7	9,81	68,68	0,01	0,07	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	1,72
8	9,78	78,26	0,01	0,08	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	1,96
9	9,76	87,86	0,01	0,09	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	2,20
10	9,73	97,32	0,01	0,10	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	2,44
11	9,70	106,72	0,01	0,11	0,15	0,15	1,00	1,50	2,50	2,67
12	9,66	115,94	0,01	0,12	0,14	0,15	1,00	1,50	2,50	2,90
13	9,62	125,09	0,01	0,13	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	3,13
14	9,57	134,01	0,01	0,14	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	3,35
15	9,52	142,83	0,01	0,15	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	3,58
16	9,46	151,39	0,01	0,16	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	3,79
17	9,39	159,66	0,01	0,17	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	4,00
18	9,32	167,80	0,01	0,18	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	4,20
19	9,24	175,60	0,01	0,19	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	4,40
20	9,15	183,04	0,01	0,20	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	4,58
21	9,04	189,88	0,01	0,21	0,14	0,14	1,00	1,50	2,50	4,75
22	8,92	196,28	0,01	0,22	0,13	0,13	1,00	1,50	2,50	4,91
23	8,77	201,76	0,01	0,23	0,13	0,13	1,00	1,50	2,50	5,05
24	8,59	206,21	0,01	0,24	0,13	0,13	1,00	1,50	2,50	5,16
25	8,37	209,30	0,01	0,25	0,13	0,13	1,00	1,50	2,50	5,24
26	8,09	210,39	0,01	0,26	0,12	0,12	1,00	1,50	2,50	5,27
27	7,73	208,76	0,01	0,27	0,12	0,12	1,00	1,51	2,51	5,23
28	7,27	203,62	0,01	0,28	0,11	0,11	1,00	1,51	2,51	5,10
29	6,69	194,07	0,01	0,29	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	4,87
30	5,94	178,26	0,01	0,30	0,09	0,09	1,00	1,51	2,51	4,47
31	4,97	154,13	0,01	0,31	0,07	0,08	1,00	1,51	2,51	3,87
32	3,71	118,78	0,01	0,32	0,06	0,06	1,00	1,52	2,52	3,00
33	2,09	69,04	0,01	0,33	0,03	0,03	1,00	1,57	2,57	1,78
34	0,33	11,29	0,01	0,34	0,00	0,01	1,00	3,31	4,31	0,49

Для третьої серії вимірювань також було виконано оцінювання випадкових та інструментальних похибок, а також визначено похибку непрямого вимірювання потужності. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати оцінювання похибок для третьої серії вимірювань

U, В	I _{сер} , А	P, Вт	ΔI _{вип} , А	ΔU _{інстр} , В	ΔI _{інстр} , А	ΔI, А	ε _U , %	ε _I , %	ε _P , %	ΔP, Вт
1	7,16	7,16	0,01	0,01	0,11	0,11	1,00	1,51	2,51	0,18
2	7,15	14,30	0,01	0,02	0,11	0,11	1,00	1,51	2,51	0,36
3	7,13	21,40	0,01	0,03	0,11	0,11	1,00	1,51	2,51	0,54
4	7,11	28,45	0,01	0,04	0,11	0,11	1,00	1,51	2,51	0,71
5	7,09	35,46	0,01	0,05	0,11	0,11	1,00	1,51	2,51	0,89
6	7,06	42,37	0,01	0,06	0,11	0,11	1,00	1,51	2,51	1,06
7	7,03	49,22	0,01	0,07	0,11	0,11	1,00	1,51	2,51	1,23
8	6,99	55,94	0,01	0,08	0,10	0,11	1,00	1,51	2,51	1,40
9	6,95	62,57	0,01	0,09	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	1,57
10	6,90	69,02	0,01	0,10	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	1,73
11	6,84	75,26	0,01	0,11	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	1,89
12	6,77	81,26	0,01	0,12	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	2,04
13	6,69	87,00	0,01	0,13	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	2,18
14	6,60	92,43	0,01	0,14	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	2,32
15	6,49	97,38	0,01	0,15	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	2,44
16	6,36	101,79	0,01	0,16	0,10	0,10	1,00	1,51	2,51	2,55
17	6,20	105,43	0,01	0,17	0,09	0,09	1,00	1,51	2,51	2,64
18	6,01	108,22	0,01	0,18	0,09	0,09	1,00	1,51	2,51	2,71
19	5,78	109,86	0,01	0,19	0,09	0,09	1,00	1,51	2,51	2,76
20	5,50	110,04	0,01	0,20	0,08	0,08	1,00	1,51	2,51	2,76
21	5,16	108,40	0,01	0,21	0,08	0,08	1,00	1,51	2,51	2,72
22	4,75	104,54	0,01	0,22	0,07	0,07	1,00	1,51	2,51	2,63
23	4,27	98,26	0,01	0,23	0,06	0,06	1,00	1,52	2,52	2,47
24	3,69	88,61	0,01	0,24	0,06	0,06	1,00	1,52	2,52	2,24
25	3,00	75,05	0,01	0,25	0,05	0,05	1,00	1,54	2,54	1,90
26	2,19	56,99	0,01	0,26	0,03	0,03	1,00	1,57	2,57	1,46
27	1,27	34,34	0,01	0,27	0,02	0,02	1,00	1,69	2,69	0,92
28	0,25	7,06	0,01	0,28	0,00	0,01	1,00	4,17	5,17	0,36

Аналіз отриманих результатів показує, що основний внесок у сумарну похибку створюють інструментальні похибки каналів вимірювання напруги та струму, тоді як випадкова складова, визначена за результатами десяти послідовних вимірювань, має значно менший вплив на кінцевий результат. Отримані значення похибок не впливають на характер побудованих вольт-амперних характеристик та дозволяють вважати результати вимірювань достатньо достовірними для визначення основних параметрів фотоелектричного модуля та подальшого аналізу його роботи при різних рівнях сонячного випромінювання.

3.6 Аналіз отриманих результатів

Після побудови вольт-амперних характеристик та залежностей потужності від напруги для трьох серій вимірювань було виконано аналіз отриманих результатів. Основна увага приділялася порівнянню характеристик фотоелектричного модуля при різних рівнях інсоляції, визначенню точки максимальної потужності та порівнянню отриманих параметрів із паспортними характеристиками модуля Jinko Solar JKM425N-54HL4R.

Вимірювання проводилися для трьох рівнів сонячного випромінювання. У першій серії середнє значення інсоляції становило 948 Вт/м^2 , у другій — 715 Вт/м^2 , а у третій — 518 Вт/м^2 . Такий розподіл умов дозволяє оцінити, як зміна інсоляції впливає на форму вольт-амперної характеристики та вихідну потужність фотоелектричного модуля.

За результатами першої серії вимірювань при середній інсоляції 948 Вт/м^2 струм короткого замикання становив $13,04 \text{ А}$, напруга холостого ходу — 37 В , а максимальна потужність досягала $313,8 \text{ Вт}$. Точка максимальної потужності відповідала напрузі 29 В та струму $10,82 \text{ А}$. Отримана характеристика має типову форму для кремнієвого фотоелектричного модуля: при малих значеннях напруги струм залишається майже сталим, а після проходження області максимальної потужності різко зменшується при наближенні до режиму холостого ходу.

У другій серії вимірювань середня інсоляція становила 715 Вт/м^2 . При цьому струм короткого замикання зменшився до $9,91 \text{ А}$, напруга холостого ходу склала 34 В , а максимальна потужність становила $210,3 \text{ Вт}$. Точка максимальної потужності була отримана при напрузі 26 В та струмі $8,09 \text{ А}$. Порівняно з першою серією найбільше змінився саме струм, тоді як напруга зменшилася менш суттєво. Це відповідає характерній поведінці фотоелектричних модулів, оскільки струм фотомодуля значною мірою залежить від рівня сонячного випромінювання.

У третій серії вимірювань середня інсоляція становила 518 Вт/м^2 . За цих умов струм короткого замикання дорівнював $7,17 \text{ А}$, напруга холостого ходу — 28

В, а максимальна потужність становила 110,0 Вт. Точка максимальної потужності відповідала напрузі 20 В та струму 5,50 А. Зниження інсоляції порівняно з першою серією призвело до помітного зменшення струму та вихідної потужності фотоелектричного модуля.

Порівняння трьох вольт-амперних характеристик показує, що зі зменшенням рівня інсоляції криві зміщуються вниз по осі струму. При цьому загальна форма характеристики зберігається. Для всіх трьох серій спостерігається область майже сталого струму при малих та середніх значеннях напруги, область перегину поблизу точки максимальної потужності та різке спадання струму при наближенні до напруги холостого ходу.

Найбільш помітний вплив інсоляція має на струм короткого замикання. У першій серії при середній інсоляції 948 Вт/м² струм короткого замикання становив 13,04 А. При зменшенні інсоляції до 715 Вт/м² у другій серії струм короткого замикання зменшився до 9,91 А. У третій серії при інсоляції 518 Вт/м² він становив 7,17 А. Тобто зі зменшенням сонячного випромінювання струм фотоелектричного модуля зменшується майже пропорційно.

Максимальна потужність також суттєво залежить від рівня інсоляції. У першій серії вона становила 313,8 Вт, у другій — 210,3 Вт, а у третій — 110,0 Вт. Зменшення максимальної потужності пояснюється зменшенням струму, який генерується фотоелектричним модулем при нижчому рівні сонячного випромінювання. При цьому зниження потужності відбувається сильніше, ніж зміна напруги, оскільки потужність залежить одночасно від напруги та струму.

Напруга холостого ходу змінювалася менш рівномірно, ніж струм. Для першої серії вона становила 37 В, для другої — 34 В, а для третьої — 28 В. У реальних умовах на напругу холостого ходу впливає не тільки інсоляція, а й температура фотоелектричного модуля, стан навантаження та точність фіксації області, близької до холостого ходу. Саме тому зміна напруги не є прямо пропорційною зміні сонячного випромінювання.

Окремо слід врахувати вплив температури фотоелектричного модуля. У першій серії середня температура модуля становила 49,28 °С, у другій — 41,95 °С, а у третій — 36,21 °С. Підвищення температури призводить до зменшення напруги та вихідної потужності модуля. Тому навіть при достатньо високій інсоляції в першій серії отримана максимальна потужність є нижчою за паспортне значення, оскільки паспортні параметри визначаються за стандартних умов випробувань, де температура фотоелемента становить 25 °С.

Паспортні параметри фотоелектричного модуля JKM425N-54HL4R становлять: номінальна потужність 425 Вт, напруга в точці максимальної потужності 32,18 В, струм у точці максимальної потужності 13,21 А, напруга холостого ходу 38,75 В та струм короткого замикання 13,66 А [11]. Порівняння з результатами першої серії показує, що отримані значення є нижчими за паспортні. Це пояснюється тим, що вимірювання проводилися не за стандартних умов STC, а в реальних умовах, де інсоляція була нижчою за 1000 Вт/м², а температура модуля була вищою за 25 °С.

Для першої серії відхилення максимальної потужності від паспортного значення становить 111,2 Вт. У відсотковому вираженні це відповідає зменшенню на 26,2 %. Відхилення напруги в точці максимальної потужності становить 3,18 В, або 9,9 %. Відхилення струму в точці максимальної потужності становить 2,39 А, або 18,1 %. Отримані відхилення пояснюються поєднаним впливом нижчої інсоляції, підвищеної температури модуля та похибок вимірювання.

У другій серії відхилення максимальної потужності від паспортного значення становить 214,7 Вт, тобто 50,5 %. Напруга в точці максимальної потужності зменшилася на 6,18 В, або 19,2 %, а струм у точці максимальної потужності — на 5,12 А, або 38,8 %. Таке зниження є очікуваним, оскільки середня інсоляція у другій серії становила 715 Вт/м², що значно нижче за стандартні 1000 Вт/м².

У третій серії відхилення максимальної потужності від паспортного значення становить 315,0 Вт, або 74,1 %. Напруга в точці максимальної

потужності зменшилася на 12,18 В, або 37,8 %, а струм у точці максимальної потужності — на 7,71 А, або 58,4 %. Такі значення відповідають умовам нижчої інсоляції, за яких фотоелектричний модуль генерує значно менший струм і, відповідно, меншу потужність.

Для зручності порівняння отриманих результатів із паспортними характеристиками доцільно навести окрему таблицю відхилень.

Таблиця 3.8 – Порівняння отриманих параметрів із паспортними характеристиками фотомодуля JKM425N-54HL4R

Параметр	Паспортне значення	Серія 1	Відхилення серії 1, %	Серія 2	Відхилення серії 2, %	Серія 3	Відхилення серії 3, %
P_{max} , Вт	425	313,8	26,2	210,3	50,5	110	74,1
U_{mp} , В	32,18	29	9,9	26	19,2	20	37,8
I_{mp} , А	13,21	10,82	18,1	8,09	38,8	5,5	58,4
U_{oc} , В	38,75	37	4,5	34	12,3	28	27,7
I_{sc} , А	13,66	13,04	4,5	9,91	27,5	7,17	47,5

З таблиці видно, що найменші відхилення від паспортних параметрів спостерігаються у першій серії вимірювань, яка проводилася при найвищому рівні інсоляції. Найбільші відхилення отримані у третій серії, де рівень сонячного випромінювання був найнижчим. Це підтверджує, що інсоляція є основним фактором, який визначає струм та вихідну потужність фотоелектричного модуля.

Водночас не можна пояснювати всі відхилення лише зменшенням інсоляції. На результати також впливають температура модуля, точність датчиків напруги та струму, похибка перерахунку освітленості в інсоляцію, ручне встановлення напруги за допомогою реостата та дискретність вибору точок вимірювання. Однак ці фактори не змінюють загального характеру отриманих залежностей і не суперечать теоретичним положенням щодо роботи фотоелектричних модулів.

Оцінювання похибок, виконане у підрозділі 3.5, показало, що похибка визначення потужності не є визначальною причиною зменшення отриманих

значень порівняно з паспортними. Основна різниця пояснюється саме відмінністю реальних умов вимірювання від стандартних умов випробувань. Тому результати вимірювань слід розглядати як характеристику роботи модуля в конкретних умовах освітлення та температури, а не як перевірку паспортної потужності при STC.

Отримані вольт-амперні характеристики підтверджують працездатність розробленої інформаційно-вимірювальної системи. Система дозволила отримати послідовні набори даних для різних рівнів інсоляції, побудувати графічні залежності, визначити точки максимальної потужності та виконати порівняння з паспортними характеристиками. Завдяки збереженню результатів на карту пам'яті зменшується вплив ручного запису даних, а наявність десяти вимірювань струму для кожної точки дає можливість оцінити випадкову складову похибки.

Таким чином, аналіз отриманих результатів показав, що розроблена інформаційно-вимірювальна система на базі Arduino може використовуватися для дослідження вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів. Система забезпечує отримання даних, достатніх для визначення основних параметрів модуля, побудови ВАХ, визначення точки максимальної потужності та аналізу впливу інсоляції на роботу фотоелектричної панелі.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 492 с.
2. Фотоелектричний ефект // Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Фотоелектричний_ефект (дата звернення: 10.05.2026).
3. Як працює сонячна панель // SUN ENERGY : вебсайт. URL: https://sun-energy.com.ua/statti/yak_pratsyuye_sonyachna_panel (дата звернення: 11.05.2026).
4. Solar panel // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_panel (дата звернення: 13.05.2026).
5. Фотоелектрична панель Panasonic 240 W монокристалічна // Batareykin : вебсайт. URL: <https://batareykin.com.ua/fotoelektricheskaya-panel-panasonic-240w-monokristallicheskaya.html> (дата звернення: 15.05.2026).
6. Сонячна панель Victron Energy 115 W полікристалічна // Solarex : вебсайт. URL: <https://solarex.com.ua/catalog/sonyachni-paneli/polikristalichni/sonyachna-panel-victron-energy-115w-12v-series-4a-115wp-spp041151200/> (дата звернення: 18.05.2026).
7. Thin-Film Solar Panels // Shilden : website. URL: <https://uk.shieldenchannel.com/blogs/solar-panels/thin-film-solar-panels> (дата звернення: 20.05.2026).
8. Потужність електричного струму // Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Потужність_електричного_струму (дата звернення: 22.05.2026).
9. Прості механізми. Коефіцієнт корисної дії // МійКлас : освітній портал. URL: <https://www.miyklas.com.ua/p/fzika/7-klas/robota-i-potuzhnist-energiia->

- [16513/prosti-mekhanizmi-koefitciyent-korisnoyi-diyi-16522/re-17e3ea46-47ff-4260-8207-74ad4b92499b](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar-cell_efficiency#Fill_factor) (дата звернення: 24.05.2026).
10. Solar-cell efficiency. Fill factor // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar-cell_efficiency#Fill_factor (дата звернення: 26.05.2026).
 11. Tiger Neo 54HL4R-B JKM425-445N-54HL4R-B : technical specification // Jinko Solar : вебсайт. URL: https://e-energy.in.ua/files/f_1741939313_4570-05-tiger_neo_54hl4r-b_jkm425-445n-54hl4r-b-f2-en-4.pdf (дата звернення: 28.05.2026).
 12. Вольт-амперна характеристика сонячних панелей при різних рівнях інсоляції // Green Power Talk : вебсайт. URL: <https://greenpowertalk.tech/blog/вольт-амперна-характеристика-сонячн/> (дата звернення: 30.05.2026).
 13. Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. 676 p.
 14. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник. Вінниця : ВНТУ, 2011. 522 с.
 15. Вимірювання. Похибки. Етапи здійснення і запису вимірювань // На Урок : освітній портал. URL: <https://naurok.com.ua/vimiryuvannya-pohibki-etapi-zdiysnennya-i-zapisu-vimiryuvan-433039.html> (дата звернення: 02.06.2026).
 16. Arduino Uno R3 CH340 // Arduino.ua : вебсайт. URL: <https://arduino.ua/prod2610-arduino-uno-r3-ch340> (дата звернення: 04.06.2026).
 17. Подільник напруги // Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Подільник_напруги (дата звернення: 05.06.2026).
 18. Лінійний датчик струму ACS758 // Robostore : вебсайт. URL: <https://robostore.com.ua/lineynyy-datchik-toka-ac758/> (дата звернення: 06.06.2026).

- 19.Реостат 500 Вт 20 Ом // AliExpress : вебсайт. URL: <https://www.aliexpress.com/item/1005002463786367.html> (дата звернення: 08.06.2026).
- 20.Датчик температури DS18B20 в корпусі з кабелем // Mini-Tech : вебсайт. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/datchik-temperatury-ds18b20-v-korpuse-s-kabelem> (дата звернення: 10.06.2026).
- 21.Датчик освітленості цифровий BH1750FVI // Arduino.ua : вебсайт. URL: <https://arduino.ua/ru/prod1116-datchik-osveshhenosti-cifrovoy-bh1750fvi> (дата звернення: 12.06.2026).
- 22.Дисплей дворядковий LCD1602A // Electronica : вебсайт. URL: <https://electronica.in.ua/ua/p1530387506-displej-dvuhstrochnyj-lcd1602a.html> (дата звернення: 14.06.2026).
- 23.ChatGPT // OpenAI : вебзастосунок. URL: <https://chatgpt.com> (дата звернення: 14.06.2026).

Додатки

Додаток А

Програмне забезпечення Arduino Uno R3

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <BH1750.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#define PIN_U  A0
#define PIN_I  A1
#define PIN_DS  2
#define PIN_SD 10

const byte SERIES = 1;
const byte N = 10;
const unsigned long DT = 1000;
const float VREF = 5.0;
const float ADCMAX = 1023.0;
const float KU = 11.0;      // (100к + 10к) / 10к
const float ACS_ZERO = 2.50; // нуль датчика, В
const float ACS_SENS = 0.100; // В/А
const float LUX_PER_WM2 = 120.0;
const float MIN_DU = 0.6;
const float STAB_DU = 0.15;
const unsigned long STAB_TIME = 2000;
```

```

OneWire oneWire(PIN_DS);
DallasTemperature ds(&oneWire);
BH1750 light;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
int point = 1;
float lastU = -1;
float Pmax = 0, Ump = 0, Imp = 0;
void printComma(File &f, float x, byte d) {
    char b[16];
    dtostrf(x, 0, d, b);
    for (byte i = 0; b[i]; i++) if (b[i] == '.') b[i] = ',';
    f.print(b);
}
int analogAvg(byte pin) {
    long s = 0;
    for (byte i = 0; i < 10; i++) {
        s += analogRead(pin);
        delay(2);
    }
    return s / 10;
}
float readU() {
    float u = analogAvg(PIN_U) * VREF / ADCMAX * KU;
    return (u < 0.05) ? 0 : u;
}
float readI() {
    float v = analogAvg(PIN_I) * VREF / ADCMAX;
    float i = (v - ACS_ZERO) / ACS_SENS;
    return (abs(i) < 0.03) ? 0 : i;
}

```

```

}
float readT() {
    ds.requestTemperatures();
    return ds.getTempCByIndex(0);
}
float readG() {
    float lux = light.readLightLevel();
    return (lux < 0) ? -1 : lux / LUX_PER_WM2;
}
void lcdMsg(const __FlashStringHelper *a, const __FlashStringHelper *b = nullptr) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(a);
    if (b) {
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(b);
    }
}
float waitStableU() {
    if (lastU >= 0) {
        lcdMsg(F("CHANGE U"));
        while (abs(readU() - lastU) < MIN_DU) {
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print(F("U="));
            lcd.print(readU(), 1);
            lcd.print(F("V    "));
            delay(300);
        }
    }
}

```

```

lcdMsg(F("WAIT STABLE U"));
float prev = readU();
unsigned long t0 = 0;
while (true) {
    float u = readU();
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(F("U="));
    lcd.print(u, 1);
    lcd.print(F("V    "));
    if (abs(u - prev) <= STAB_DU) {
        if (t0 == 0) t0 = millis();
        if (millis() - t0 >= STAB_TIME) return u;
    } else {
        t0 = 0;
    }
    prev = u;
    delay(300);
}
}

void header() {
    if (SD.exists("DATA.CSV")) return;
    File f = SD.open("DATA.CSV", FILE_WRITE);
    if (!f) return;
    f.print(F("Series;Point;U_V;G_Wm2;T_C;"));
    for (byte i = 1; i <= N; i++) {
        f.print(F("I"));
        f.print(i);
        f.print(F("_A;"));
    }
}

```



```

    f.println(F("Iavg_A;P_W;Pmax_W;Ump_V;Imp_A"));
    f.close();
}

void measurePoint() {
    float U = waitStableU();
    float T = readT();
    float G = readG();
    File f = SD.open("DATA.CSV", FILE_WRITE);
    if (!f) {
        lcdMsg(F("SD WRITE ERROR"));
        delay(2000);
        return;
    }
    f.print(SERIES); f.print(';');
    f.print(point); f.print(';');
    printComma(f, U, 2); f.print(';');
    printComma(f, G, 0); f.print(';');
    printComma(f, T, 1); f.print(';');
    float Isum = 0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("POINT "));
    lcd.print(point);
    for (byte k = 1; k <= N; k++) {
        float I = readI();
        Isum += I;
        printComma(f, I, 2);
        f.print(';');
        lcd.setCursor(0, 1);
    }
}

```

```
    lcd.print(F("I "));  
    lcd.print(k);  
    lcd.print(F("/"));  
    lcd.print(N);  
    lcd.print(F(" "));  
    lcd.print(I, 2);  
    lcd.print(F("A "));  
    delay(DT);  
}  
  
float Iavg = Isum / N;  
float P = U * Iavg;  
if (P > Pmax) {  
    Pmax = P;  
    Ump = U;  
    Imp = Iavg;  
}  
  
printComma(f, Iavg, 2); f.print(';');  
printComma(f, P, 1);   f.print(';');  
printComma(f, Pmax, 1); f.print(';');  
printComma(f, Ump, 2); f.print(';');  
printComma(f, Imp, 2);  
f.println();  
f.close();  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print(F("SAVED P="));  
lcd.print(P, 1);  
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print(F("Pmax="));
```

```

    lcd.print(Pmax, 1);
    lastU = U;
    point++;
    delay(2500);
    lcdMsg(F("CHANGE U"), F("RHEOSTAT"));
}

void setup() {
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcdMsg(F("PV I-V SYSTEM"), F("START"));
    delay(1500);
    Wire.begin();
    ds.begin();
    light.begin(BH1750::CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE);
    light.setMTreg(31); // для більшої освітленості на сонці
    lcdMsg(F("CHECK SD"));
    if (!SD.begin(PIN_SD)) {
        lcdMsg(F("SD ERROR"), F("CHECK CARD"));
        while (true);
    }
    header();
    lcdMsg(F("SYSTEM READY"), F("SET FIRST U"));
    delay(2000);
}

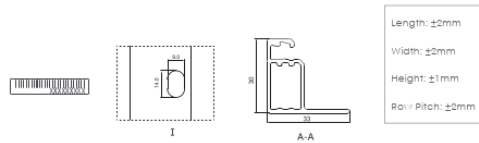
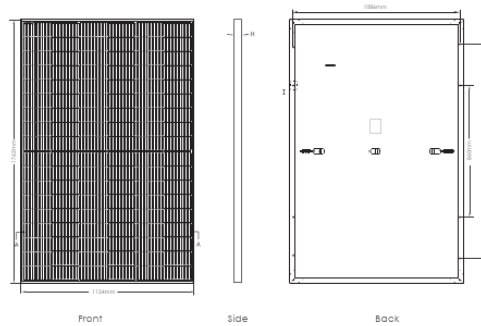
void loop() {
    measurePoint();
}

```

Додаток Б

Даташит використаного фотомодуля

Engineering Drawings



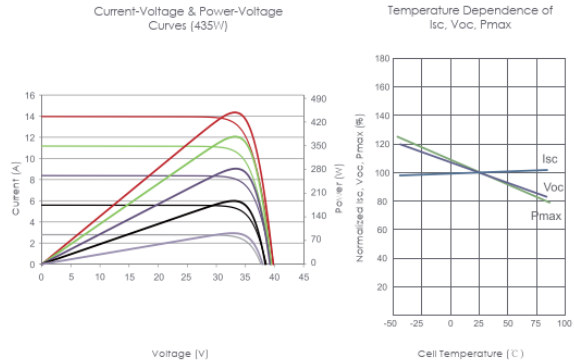
*This tolerance range applies only to the four-angle distance of the module as indicated above.

Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)

36pcs/pallets, 72pcs/stack, 936pcs/ 40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	108 (2×54)
Dimensions	1762×1134×30mm (69.36×44.65×1.18 inch)
Weight	22 kg (48.50 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM425N-54HL4R		JKM430N-54HL4R		JKM435N-54HL4R		JKM440N-54HL4R		JKM445N-54HL4R	
	JKM425N-54HL4R-V		JKM430N-54HL4R-V		JKM435N-54HL4R-V		JKM440N-54HL4R-V		JKM445N-54HL4R-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	425Wp	320Wp	430Wp	323Wp	435Wp	327Wp	440Wp	331Wp	445Wp	335Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	32.18V	29.99V	32.38V	30.10V	32.59V	30.33V	32.81V	30.56V	33.02V	30.76V
Maximum Power Current (Imp)	13.21A	10.67A	13.28A	10.73A	13.35A	10.78A	13.41A	10.83A	13.48A	10.89A
Open-circuit Voltage (Voc)	38.75V	36.81V	38.95V	37.00V	39.16V	37.20V	39.38V	37.41V	39.59V	37.61V
Short-circuit Current (Isc)	13.66A	11.03A	13.73A	11.09A	13.80A	11.14A	13.86A	11.19A	13.93A	11.25A
Module Efficiency STC (%)	21.27%		21.52%		21.77%		22.02%		22.27%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.29%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.25%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.045%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

*STC: Irradiance 1000W/m² Cell Temperature 25°C

NOCT: Irradiance 800W/m² Ambient Temperature 20°C

AM=1.5

AM=1.5

Wind Speed 1m/s

Додаток В

Повні таблиці вимірів

Таблиця 4.1 – Перша серія вимірювань

U, В	G, Вт/м ²	T, °C	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	Iсер, А	P, Вт
1	949	49,4	13,04	13,01	13,03	13,02	13,05	13,02	13,03	13,04	13,01	13,03	13,03	13,03
2	953	49,4	13,03	13,02	13,04	13	13,02	13,05	13,03	13,01	13,04	13,02	13,03	26,05
3	950	49,3	13,02	13	13,01	13,03	13,02	13,04	13,01	13,02	13	13,03	13,02	39,05
4	948	49,2	13,01	13,03	13	13,02	12,99	13,01	13,02	13	13,03	13,01	13,01	52,05
5	952	49,2	13	12,98	13,01	12,99	13,02	13	12,99	13,01	13	12,98	13,00	64,99
6	954	49,2	12,99	12,97	13	12,98	12,99	13,01	12,98	12,99	12,97	13	12,99	77,93
7	951	49,1	12,98	12,96	12,99	12,97	12,98	12,99	12,97	12,98	12,96	12,99	12,98	90,84
8	947	49,1	12,96	12,95	12,98	12,96	12,97	12,95	12,96	12,98	12,95	12,97	12,96	103,70
9	950	49	12,95	12,93	12,96	12,94	12,95	12,97	12,94	12,95	12,93	12,96	12,95	116,53
10	946	49,1	12,93	12,92	12,94	12,91	12,93	12,95	12,92	12,94	12,91	12,93	12,93	129,28
11	948	49	12,91	12,9	12,92	12,89	12,91	12,93	12,9	12,92	12,89	12,91	12,91	141,99
12	951	49,1	12,89	12,87	12,9	12,88	12,89	12,91	12,88	12,9	12,87	12,89	12,89	154,66
13	949	49,2	12,86	12,85	12,88	12,86	12,87	12,84	12,86	12,88	12,85	12,87	12,86	167,21
14	945	49,1	12,83	12,81	12,84	12,82	12,83	12,85	12,82	12,84	12,81	12,83	12,83	179,59
15	947	49,2	12,79	12,78	12,81	12,79	12,8	12,77	12,79	12,81	12,78	12,8	12,79	191,88
16	950	49,2	12,75	12,73	12,76	12,74	12,75	12,77	12,74	12,76	12,73	12,75	12,75	203,97
17	948	49,3	12,7	12,68	12,71	12,69	12,7	12,72	12,69	12,71	12,68	12,7	12,70	215,87
18	944	49,2	12,64	12,62	12,65	12,63	12,64	12,66	12,63	12,65	12,62	12,64	12,64	227,48
19	946	49,3	12,57	12,55	12,58	12,56	12,57	12,59	12,56	12,58	12,55	12,57	12,57	238,79
20	949	49,4	12,49	12,47	12,5	12,48	12,49	12,51	12,48	12,5	12,47	12,49	12,49	249,76
21	947	49,3	12,4	12,38	12,41	12,39	12,4	12,42	12,39	12,41	12,38	12,4	12,40	260,36
22	945	49,4	12,3	12,28	12,31	12,29	12,3	12,32	12,29	12,31	12,28	12,3	12,30	270,56
23	948	49,4	12,18	12,16	12,19	12,17	12,18	12,2	12,17	12,19	12,16	12,18	12,18	280,09
24	950	49,5	12,04	12,02	12,05	12,03	12,04	12,06	12,03	12,05	12,02	12,04	12,04	288,91
25	946	49,4	11,88	11,86	11,89	11,87	11,88	11,9	11,87	11,89	11,86	11,88	11,88	296,95
26	944	49,5	11,69	11,67	11,7	11,68	11,69	11,71	11,68	11,7	11,67	11,69	11,69	303,89
27	947	49,5	11,46	11,44	11,47	11,45	11,46	11,48	11,45	11,47	11,44	11,46	11,46	309,37
28	949	49,6	11,18	11,16	11,19	11,17	11,18	11,2	11,17	11,19	11,16	11,18	11,18	312,98
29	945	49,5	10,82	10,8	10,83	10,81	10,82	10,84	10,81	10,83	10,8	10,82	10,82	313,72
30	943	49,5	10,35	10,33	10,36	10,34	10,35	10,37	10,34	10,36	10,33	10,35	10,35	310,44
31	946	49,4	9,72	9,7	9,73	9,71	9,72	9,74	9,71	9,73	9,7	9,72	9,72	301,26
32	948	49,4	8,88	8,86	8,89	8,87	8,88	8,9	8,87	8,89	8,86	8,88	8,88	284,10
33	944	49,3	7,76	7,74	7,77	7,75	7,76	7,78	7,75	7,77	7,74	7,76	7,76	256,01
34	942	49,3	6,25	6,23	6,26	6,24	6,25	6,27	6,24	6,26	6,23	6,25	6,25	212,43
35	945	49,2	4,22	4,2	4,23	4,21	4,22	4,24	4,21	4,23	4,2	4,22	4,22	147,63
36	943	49,2	1,52	1,5	1,53	1,51	1,52	1,54	1,51	1,53	1,5	1,52	1,52	54,65
37	941	49,1	0,08	0,07	0,08	0,09	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08	0,09	0,08	2,92

Таблиця 4.2 – Друга серія вимірювань

U, В	G, Вт/м²	T, °C	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	Iср, А	P, Вт
1	719	41,8	9,91	9,89	9,9	9,92	9,89	9,91	9,9	9,89	9,91	9,9	9,90	9,90
2	722	41,9	9,9	9,88	9,89	9,91	9,88	9,9	9,89	9,88	9,9	9,89	9,89	19,78
3	720	42	9,88	9,86	9,87	9,89	9,86	9,88	9,87	9,86	9,88	9,87	9,87	29,62
4	718	41,9	9,87	9,85	9,86	9,88	9,85	9,87	9,86	9,85	9,87	9,86	9,86	39,45
5	716	41,9	9,85	9,83	9,84	9,86	9,83	9,85	9,84	9,83	9,85	9,84	9,84	49,21
6	719	42	9,83	9,81	9,82	9,84	9,81	9,83	9,82	9,81	9,83	9,82	9,82	58,93
7	721	42,1	9,82	9,8	9,81	9,83	9,8	9,82	9,81	9,8	9,82	9,81	9,81	68,68
8	717	42	9,79	9,77	9,78	9,8	9,77	9,79	9,78	9,77	9,79	9,78	9,78	78,26
9	715	41,9	9,77	9,75	9,76	9,78	9,75	9,77	9,76	9,75	9,77	9,76	9,76	87,86
10	718	42	9,74	9,72	9,73	9,75	9,72	9,74	9,73	9,72	9,74	9,73	9,73	97,32
11	720	42,1	9,71	9,69	9,7	9,72	9,69	9,71	9,7	9,69	9,71	9,7	9,70	106,72
12	716	42	9,67	9,65	9,66	9,68	9,65	9,67	9,66	9,65	9,67	9,66	9,66	115,94
13	714	42	9,63	9,61	9,62	9,64	9,61	9,63	9,62	9,61	9,63	9,62	9,62	125,09
14	717	42,1	9,58	9,56	9,57	9,59	9,56	9,58	9,57	9,56	9,58	9,57	9,57	134,01
15	719	42,2	9,53	9,51	9,52	9,54	9,51	9,53	9,52	9,51	9,53	9,52	9,52	142,83
16	715	42,1	9,47	9,45	9,46	9,48	9,45	9,47	9,46	9,45	9,47	9,46	9,46	151,39
17	713	42	9,4	9,38	9,39	9,41	9,38	9,4	9,39	9,38	9,4	9,39	9,39	159,66
18	716	42,1	9,33	9,31	9,32	9,34	9,31	9,33	9,32	9,31	9,33	9,32	9,32	167,80
19	714	42,2	9,25	9,23	9,24	9,26	9,23	9,25	9,24	9,23	9,25	9,24	9,24	175,60
20	712	42,1	9,16	9,14	9,15	9,17	9,14	9,16	9,15	9,14	9,16	9,15	9,15	183,04
21	715	42	9,05	9,03	9,04	9,06	9,03	9,05	9,04	9,03	9,05	9,04	9,04	189,88
22	717	42,1	8,93	8,91	8,92	8,94	8,91	8,93	8,92	8,91	8,93	8,92	8,92	196,28
23	713	42	8,78	8,76	8,77	8,79	8,76	8,78	8,77	8,76	8,78	8,77	8,77	201,76
24	711	41,9	8,6	8,58	8,59	8,61	8,58	8,6	8,59	8,58	8,6	8,59	8,59	206,21
25	714	42	8,38	8,36	8,37	8,39	8,36	8,38	8,37	8,36	8,38	8,37	8,37	209,30
26	716	42	8,1	8,08	8,09	8,11	8,08	8,1	8,09	8,08	8,1	8,09	8,09	210,39
27	712	41,9	7,74	7,72	7,73	7,75	7,72	7,74	7,73	7,72	7,74	7,73	7,73	208,76
28	710	41,8	7,28	7,26	7,27	7,29	7,26	7,28	7,27	7,26	7,28	7,27	7,27	203,62
29	713	41,9	6,7	6,68	6,69	6,71	6,68	6,7	6,69	6,68	6,7	6,69	6,69	194,07
30	711	41,8	5,95	5,93	5,94	5,96	5,93	5,95	5,94	5,93	5,95	5,94	5,94	178,26
31	708	41,7	4,98	4,96	4,97	4,99	4,96	4,98	4,97	4,96	4,98	4,97	4,97	154,13
32	710	41,7	3,72	3,7	3,71	3,73	3,7	3,72	3,71	3,7	3,72	3,71	3,71	118,78
33	707	41,6	2,1	2,08	2,09	2,11	2,08	2,1	2,09	2,08	2,1	2,09	2,09	69,04
34	705	41,5	0,34	0,32	0,33	0,35	0,32	0,34	0,33	0,32	0,34	0,33	0,33	11,29

Таблиця 4.3 – Третя серія вимірювань

U, В	G, Вт/м²	T, °C	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	Iср, А	P, Вт
1	521	36,1	7,17	7,15	7,16	7,18	7,15	7,17	7,16	7,15	7,17	7,16	7,16	7,16
2	519	36,3	7,16	7,14	7,15	7,17	7,14	7,16	7,15	7,14	7,16	7,15	7,15	14,30
3	516	36	7,14	7,12	7,13	7,15	7,12	7,14	7,13	7,12	7,14	7,13	7,13	21,40
4	520	36,2	7,12	7,1	7,11	7,13	7,1	7,12	7,11	7,1	7,12	7,11	7,11	28,45
5	523	36,4	7,1	7,08	7,09	7,11	7,08	7,1	7,09	7,08	7,1	7,09	7,09	35,46
6	521	36,1	7,07	7,05	7,06	7,08	7,05	7,07	7,06	7,05	7,07	7,06	7,06	42,37
7	518	36,3	7,04	7,02	7,03	7,05	7,02	7,04	7,03	7,02	7,04	7,03	7,03	49,22
8	516	36,2	7	6,98	6,99	7,01	6,98	7	6,99	6,98	7	6,99	6,99	55,94
9	519	36,5	6,96	6,94	6,95	6,97	6,94	6,96	6,95	6,94	6,96	6,95	6,95	62,57
10	522	36,1	6,91	6,89	6,9	6,92	6,89	6,91	6,9	6,89	6,91	6,9	6,90	69,02
11	520	35,9	6,85	6,83	6,84	6,86	6,83	6,85	6,84	6,83	6,85	6,84	6,84	75,26
12	517	36,3	6,78	6,76	6,77	6,79	6,76	6,78	6,77	6,76	6,78	6,77	6,77	81,26
13	520	36,2	6,7	6,68	6,69	6,71	6,68	6,7	6,69	6,68	6,7	6,69	6,69	87,00
14	523	36,4	6,61	6,59	6,6	6,62	6,59	6,61	6,6	6,59	6,61	6,6	6,60	92,43
15	521	36	6,5	6,48	6,49	6,51	6,48	6,5	6,49	6,48	6,5	6,49	6,49	97,38
16	518	36,2	6,37	6,35	6,36	6,38	6,35	6,37	6,36	6,35	6,37	6,36	6,36	101,79
17	516	36,5	6,21	6,19	6,2	6,22	6,19	6,21	6,2	6,19	6,21	6,2	6,20	105,43
18	519	36,1	6,02	6	6,01	6,03	6	6,02	6,01	6	6,02	6,01	6,01	108,22
19	522	36,3	5,79	5,77	5,78	5,8	5,77	5,79	5,78	5,77	5,79	5,78	5,78	109,86
20	520	36,2	5,51	5,49	5,5	5,52	5,49	5,51	5,5	5,49	5,51	5,5	5,50	110,04
21	517	36,4	5,17	5,15	5,16	5,18	5,15	5,17	5,16	5,15	5,17	5,16	5,16	108,40
22	514	36	4,76	4,74	4,75	4,77	4,74	4,76	4,75	4,74	4,76	4,75	4,75	104,54
23	516	36,2	4,28	4,26	4,27	4,29	4,26	4,28	4,27	4,26	4,28	4,27	4,27	98,26
24	519	36,5	3,7	3,68	3,69	3,71	3,68	3,7	3,69	3,68	3,7	3,69	3,69	88,61
25	517	36,1	3,01	2,99	3	3,02	2,99	3,01	3	2,99	3,01	3	3,00	75,05
26	514	36,3	2,2	2,18	2,19	2,21	2,18	2,2	2,19	2,18	2,2	2,19	2,19	56,99
27	512	36	1,28	1,26	1,27	1,29	1,26	1,28	1,27	1,26	1,28	1,27	1,27	34,34
28	515	36,2	0,26	0,24	0,25	0,27	0,24	0,26	0,25	0,24	0,26	0,25	0,25	7,06