

Хмельницький національний університет

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електропобутова техніка

Розробка лабораторної установки для дослідження побутових сонячних елементів

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група ЕТз-21


Підпис

Косташ Р.І.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

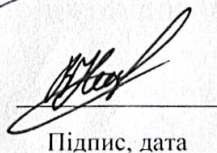
старший викладач
Лісевич С.П.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

К.т.н., доц. Тимошук О.Г.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

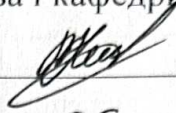
2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2. 06 .2025 р.

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

Косташ Роман Іванович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка лабораторної установки для дослідження побутових сонячних елементів**

Керівник роботи **Лісевич С.П., старший викладач**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **прототип сонячних елементів та існуючі стенди для їх дослідження, існуючі методики для обробки даних досліджень сонячних елементів**

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

1. Огляд літератури та технічних рішень дослідження роботи сонячних елементів

2 Розробка лабораторної установки для дослідження сонячних елементів

3 Методика проведення експериментальних досліджень

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

Аркуш 1. Огляд сонячних елементів та стендів для їх дослідження. Документ оглядовий. (A1). **Аркуш 2.** Технологія отримання електричної енергії від сонячних елементів. Документ технологічний. (A1). **Аркуш 3.** Лабораторна установка для дослідження сонячних елементів. Схема структурна (A2). **Аркуш 4.** Лабораторна установка для дослідження сонячних елементів. Схема електрична принципова (A2). **Аркуш 5.** Лабораторна установка для дослідження сонячних елементів. Вид загальний. (A1). **Аркуш 6.** Графіки залежності струму, напруги та потужності. Результати розрахунку. (A1)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1. Огляд літератури та технічних рішень дослідження роботи сонячних елементів	05.05.25 р.	
2 Розробка лабораторної установки для дослідження сонячних елементів	20.05.25 р.	
3 Методика проведення експериментальних досліджень	10.06.25 р.	

Студент


Підпис

Косташ Р.І.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Лісевич С.П.
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».
Освітня програма «Електропобутова техніка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Косташ Роман Іванович
2. Тема бакалаврської роботи Розробка лабораторної установки для дослідження побутових сонячних елементів
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____
4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень ___ арк., сторінок записки ___
5. Ця робота присвячена розробка універсальної лабораторної установки для дослідження побутових сонячних елементів поліпшеної конструкції.

В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам.

В першому розділі було здійснено класифікацію фотоелементів за типом матеріалу та конструкцією, що дозволило обґрунтовано обрати відповідний тип для дослідного стенда. Проведено огляд існуючих лабораторних стендів, що дозволило виявити недоліки і переваги конструкцій, які враховано при проектуванні власної установки.

В другому розділі розроблено структурну схему, електричну принципову схему стенда, яка забезпечує можливість точного вимірювання вихідних параметрів сонячних елементів. Здійснено конструктивне виконання стенда, що передбачає зручність монтажу, зміну конфігурацій і безпечну експлуатацію.

В третьому розділі роблено програму випробувань, що охоплює різні режими роботи фотоелементів при змінних умовах освітлення та навантаження. Розроблено алгоритм обробки експериментальних даних, включно з побудовою графіків залежності струму, напруги та потужності від освітленості. Це дозволяє визначити основні параметри сонячного елемента, зокрема ККД, точку максимальної потужності та інші характеристичні величини.

Підпис студента Косташ Роман Іванович

« 2 » 06 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК

Протокол 7 від «28» 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 4,0/5

Рекомендації ЕК впровадити в навчальний процес





Особливі відмітки —

Технічний секретар Бу

«28» 06 2025 р.

ЗМІСТ

Вступ	6
1. Огляд літератури та технічних рішень дослідження роботи сонячних елементів	7
1.1 Принцип роботи сонячних елементів.....	7
1.2 Класифікація та типи фотоелементів.....	10
1.3 Стан і тенденції використання сонячної енергетики.....	15
1.4 Аналіз існуючих лабораторних стендів для дослідження сонячних елементів.....	15
2 Розробка лабораторної установки для дослідження сонячних елементів....	24
2.1 Формування вимог до конструкції лабораторної установки	24
2.2 Вибір фотоелементів та елементної бази.....	24
2.3 Розробка електричної принципової схеми.....	29
2.4 Конструктивна схема стенда.....	30
2.5 Безпека експлуатації.....	34
3 Методика проведення експериментальних досліджень.....	35
3.1 Програма випробувань.....	35
3.2 Виконання вимірювань та обробка результатів досліджень.....	39
Висновки	50
Перелік джерел посилання	51
Додатки	53

БРМА 25.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	
Виконав		Косташ			Розробка лабораторної установки для дослідження побутових сонячних елементів
Перевір.		Лісевич			
Н.контр.					Літера
Затвер.		Неймак			Аркуш
					Аркушів
					у
					5
					ХНУ, ЕТз-21

Вступ

У сучасному світі питання енергозабезпечення та раціонального використання ресурсів набувають все більшої актуальності. Традиційні джерела енергії - викопне паливо, газ, вугілля - мають суттєві обмеження: вичерпність, залежність від імпорту та негативний вплив на довкілля. У зв'язку з цим все більше уваги приділяється відновлюваним джерелам енергії, серед яких сонячна енергетика займає провідне місце.

Сонячні елементи (фотоелектричні перетворювачі) дозволяють безпосередньо перетворювати енергію сонячного випромінювання в електричну. Попри широке використання цих технологій у промисловості та побуті, для їх ефективної інтеграції в енергосистеми необхідні детальні дослідження та випробування в лабораторних умовах.

Актуальність теми обумовлена потребою у створенні доступного, наочного та функціонального лабораторного стенда, який дозволяє вивчати характеристики сонячних елементів у змінних умовах освітлення, навантаження та температури. Такий стенд може бути використаний як у навчальному процесі, так і для проведення експериментальних досліджень ефективності різних типів фотоелементів.

Метою роботи є розробка лабораторної установки для дослідження параметрів сонячних елементів, аналіз його конструкції, створення електричної схеми та розробка методики проведення експериментів.

Завдання роботи полягає у вивченні фізичних основ роботи фотоелементів, виборі конструктивних і технічних рішень, моделюванні та проектуванні стенда, а також у проведенні вимірювань та аналізі отриманих результатів.

Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення навчального обладнання в закладах вищої освіти, а також як база для подальших вимірювань у сфері відновлюваної енергетики.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1. Огляд літератури та технічних рішень дослідження роботи сонячних елементів

1.1 Принцип роботи сонячних елементів

Сонячні елементи (фотоелементи) - це напівпровідникові пристрої, що перетворюють енергію сонячного випромінювання на електричну енергію за рахунок фотоелектричного ефекту. Основу таких елементів становить р-п-перехід, утворений між двома шарами напівпровідника з різною провідністю.

Коли фотони світла потрапляють на поверхню фотоелемента, вони передають свою енергію електронам у напівпровіднику. Це збуджує електрони, дозволяючи їм перейти з валентної зони до зони провідності, утворюючи носії заряду - електрони та «дірки». Завдяки внутрішньому електричному полю в області р-п-переходу, носії заряду починають рух, утворюючи електричний струм, який можна використовувати в зовнішньому колі.

Ефективність перетворення залежить від типу напівпровідника, якості виготовлення, температури, кута падіння світла та довжини хвилі сонячного випромінювання.

На рисунку 1.1 представлено схему сонячного елемента з р-п переходом та вказано напрямки руху фотогенерованих носіїв заряду. Електрони, що утворюються під дією світла в р-шарі, під впливом електричного поля переміщуються до п-шару, тоді як дірки, згенеровані в п-шарі, рухаються до р-шару. У результаті на омичних контактах виникає різниця потенціалів, яка отримала назву напруги холостого ходу $U_{x.x}$. Якщо з'єднати контакти безпосередньо, через елемент протікатиме струм короткого замикання $I_{к.з}$. Для того щоб сонячний елемент передавав електроенергію у зовнішнє коло, до його контактів підключається навантаження з певним електричним опором R_n . На схемі позначено: 1 – зовнішній електрод.

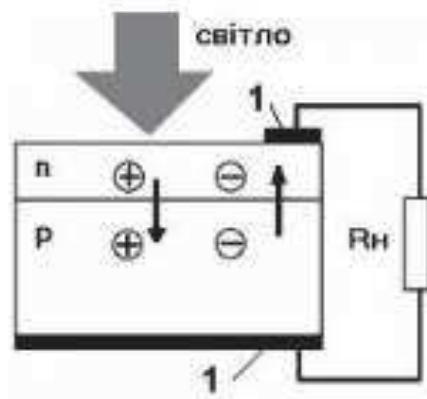
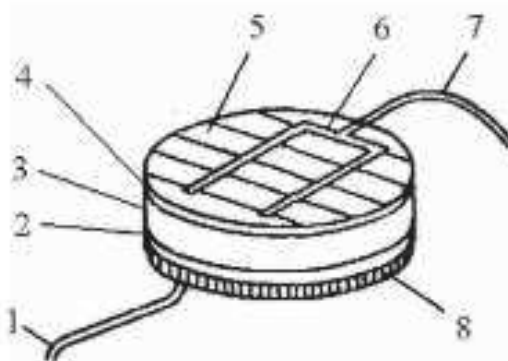


Рисунок 1.1 – Принцип роботи сонячного елемента

Сонячний елемент можна розглядати як енергетичний перетворювач, який виконує функцію своєрідної електронної «помпи», що забезпечує переміщення електронів від n-області через зовнішнє навантаження до р-області. Такий рух заряджених частинок забезпечується внутрішнім електричним полем, що утворюється в зоні р-n переходу. Загальна конструкція типового сонячного елемента наведена на рисунку 1.2.



- 1 - електричний контакт до лицьової сторони попереднього елемента;
- 2 - додатковий потенціальний бар'єр $p^+0,2 \text{ мкм}$; 3 - шар $p \text{ } 250 \dots 400 \text{ мкм}$;
- 4-шар $n \text{ } 0,2 \dots 1,0 \text{ мкм}$; 5 - противідбивне покриття; 6 - лицьовий контакт;
- 7 - електричний контакт до зворотної сторони наступного елемента;
- 8 - металевий контакт зворотної сторони

Рисунок 1.2 – Узагальнена конструкція сонячного елемента

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
8

Для спрощення зображення на схемі не показано захисну прозору кришку (яка може бути виготовлена зі скла або пластику), а також світлофільтр, що зазвичай розміщується між кришкою та активною поверхнею елемента.

Варто підкреслити, що, на відміну від традиційних хімічних джерел електроенергії, напівпровідникові сонячні елементи не зазнають деградації у випадку короткого замикання їх вихідних контактів. При оптимальному підборі опору зовнішнього навантаження сонячний елемент може забезпечити ефективну передачу енергії, причому корисна потужність може досягати до 80% від добутку напруги холостого ходу на струм короткого замикання $U_{x.x} I_{k.з}$.

До ключових параметрів, що визначають технічну ефективність сонячного елемента, належать напруга U_m і струм I_m у режимі максимальної потужності — саме при цих значеннях досягається найвища енерговіддача.

Потужність сонячного елемента визначається за формулою:

$$P_m = U_m I_m. \quad (1.1)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного елемента характеризується як відношення максимальної потужності, що генерується елементом, до потужності сонячного випромінювання P_m , яке потрапляє на його поверхню:

$$ККД = \frac{P_m}{P_0}, \quad (1.2)$$

де P_m - максимальна вихідна електрична потужність сонячного елемента, а P_0 - потужність падаючого сонячного світла на одиницю площі.

Чим більше часток (фотонів) сонячного світла поглинається фотоелектричним елементом, тим більше значення прийме струм короткого замикання $I_{k.з}$.

Підвищення ефективності сонячного елемента можливе за рахунок використання напівпровідникових матеріалів із меншою шириною забороненої зони. У такому випадку зростає частка фотонів сонячного спектра, енергії яких доста-

тно для генерації електрон-діркових пар, тобто тих, що перевищують поріг ширини забороненої зони. Водночас напруга холостого ходу сонячного елемента, що позначається як $U_{x,x}$, залежить від висоти потенціального бар'єру в області р-п переходу і, відповідно, зростає зі збільшенням ширини забороненої зони напівпровідника.

Однак при проектуванні ефективного сонячного елемента важливо не просто максимізувати значення напруги $U_{x,x}$ або струму $I_{k,z}$ окремо, а досягти максимально можливого добутку цих двох параметрів — тобто максимальної вихідної потужності $P_m = U_m I_m$. З огляду на розподіл енергії у спектрі сонячного випромінювання, існує оптимальне значення ширини забороненої зони, при якому цей добуток досягає максимуму. Це дозволяє підібрати найбільш придатний напівпровідниковий матеріал для виготовлення вискоефективних сонячних елементів.

1.2 Класифікація та типи фотоелементів

Провідну роль у сучасній промисловості сонячної енергетики відіграє кремнієва технологія, на яку припадає близько 90% загального обсягу виробництва сонячних елементів у світі. Така домінуюча позиція визначає актуальні напрямки науково-технічного прогресу в цій галузі. Серед основних переваг використання кремнію варто відзначити його широку розповсюдженість у природі, хімічну інертність, екологічну безпечність та відсутність шкідливого впливу на здоров'я людини і довкілля. Крім того, технологія виготовлення кремнієвих сонячних елементів добре узгоджується з традиційними мікроелектронними процесами, що забезпечує високу технологічну сумісність.

На сьогоднішній день коефіцієнт корисної дії промислових сонячних елементів, виготовлених на основі полікристалічного та монокристалічного кремнію, знаходиться в межах 14–18%. Енергетичний баланс для кремнієвого сонячного елемента проілюстровано на рисунку 1.3.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

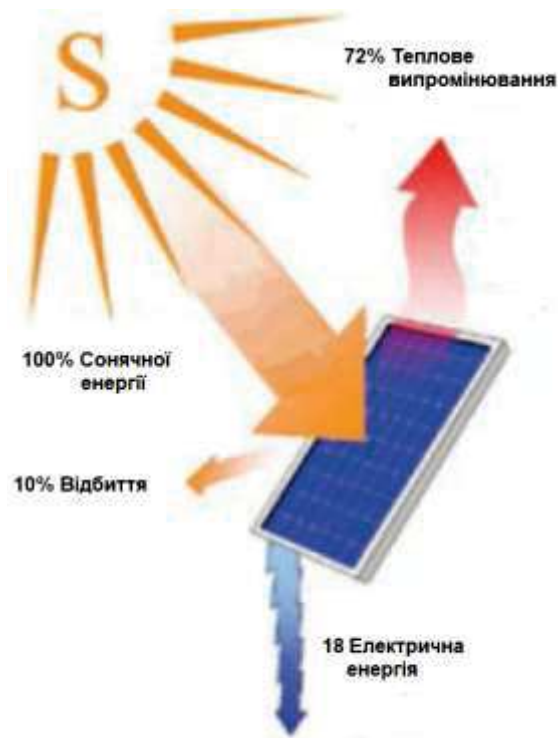


Рисунок 1.3 – Енергетичний баланс для сонячного фотоелемента

Сонячні фотоелементи класифікуються за матеріалом, конструкцією та технологією виготовлення.

1. За матеріалом: кремнієві (Si) сполуки - найпоширеніші. Вони поділяються на: монокристалічні мають високу ефективність (18–22%) та довговічність; полікристалічні мають нижчу ефективність (15–18%) проте дешевші у виробництві; аморфні (5-8%) мають низьку вартість, гнучкість та здатність ефективно працювати в умовах розсіяного світла.

Крім того елементи виготовляють із таких сполук: арсенід галію (GaAs) - висока ефективність (25-30%), використовуються в космічних технологіях; кадмій-телур (CdTe) та мідь-індій-селен (CIGS) - тонкоплівкові елементи, зручні для великомасштабного виробництва.

2. За конструкцією: традиційні панелі з жорсткою основою; гнучкі фотоелементи на полімерній основі; тандемні (багатошарові) елементи, які працюють у ширшому спектральному діапазоні.

3. За технологією: тонкоплівкові (менше матеріалу, легші); органічні фотоелементи (низька ефективність, але дешеві); перосквітні сонячні елементи -

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

перспективні, зростаюча ефективність понад 25%.

Для підвищення ефективності з сонячних елементів збирають сонячні модулі, а з модулів сонячні батареї (рис.1.4).

У сонячних енергетичних установках застосовуються різноманітні типи сонячних елементів, проте всі вони повинні відповідати ряду ключових вимог:

- забезпечувати високу надійність та стабільність роботи протягом тривалого часу (до кількох десятків років);
- виготовлятися з доступної сировини, що дозволяє організувати масове виробництво;
- характеризуватися помірними витратами на створення повноцінної системи перетворення енергії;
- мати мінімальні енергетичні та масові витрати, пов'язані з керуванням системою генерації та передачею енергії;
- бути зручними в експлуатації та технічному обслуговуванні.

З метою підвищення енерговіддачі окремі сонячні елементи об'єднуються в більші конструкції - сонячні модулі. Надалі з модулів формуються сонячні батареї, які дозволяють ефективніше акумулювати та передавати енергію (див. рис. 1.4).

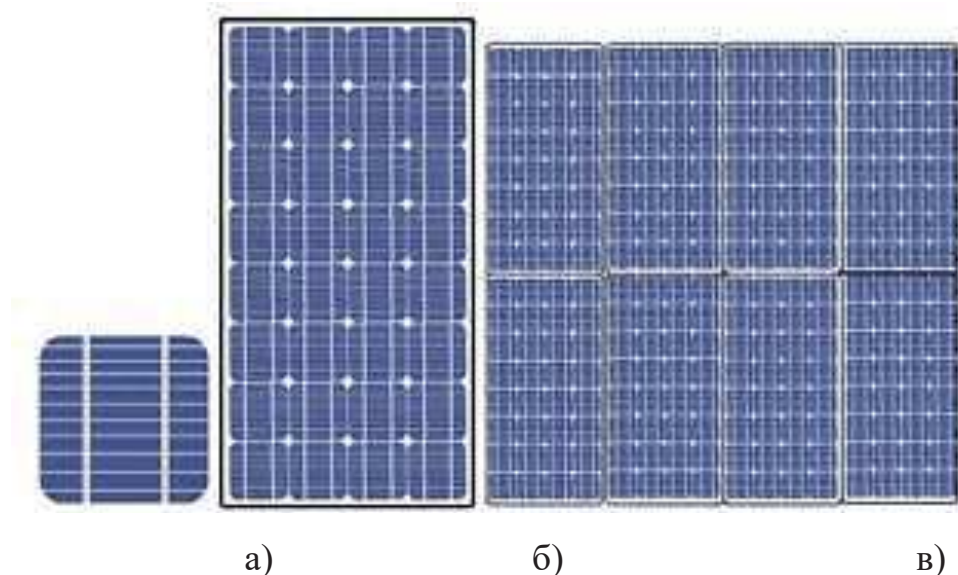


Рисунок 1.4 – Види сонячних елементів:

а) елемент; б) модуль; в) батарея

На сьогоднішній день сонячні елементи виробляються з двох основних типів кремнію — монокристалічного та полікристалічного. Полікристалічні елементи мають нижчу собівартість виготовлення, проте поступаються монокристалічним за коефіцієнтом корисної дії (ККД). Форма монокристалічних елементів — кругла або псевдоквадратна (рис. 1.5, а) — обумовлена технологією їх виготовлення: вихідні пластини вирізаються з циліндричних зливків монокристалічного кремнію. Натомість сонячні елементи з полікристалічного кремнію (рис. 1.5, б) зазвичай мають правильну квадратну форму, оскільки формуються шляхом лиття кремнію у прямокутні форми. Поверхня полікристалічних елементів має характерну зернисту структуру, що є зовнішньою ознакою багатокристалічної будови матеріалу.

На сучасному етапі сонячні елементи виготовляються переважно з монокристалічного або полікристалічного кремнію. Полікристалічні елементи мають нижчу собівартість виробництва, однак поступаються монокристалічним за значенням коефіцієнта корисної дії (ККД).

Форма сонячних елементів із монокристалічного кремнію — кругла або псевдоквадратна (рис. 1.5, а) - зумовлена тим, що їх виготовляють шляхом розрізання циліндричних зливків монокристалічного кремнію на тонкі пластини. Натомість елементи з полікристалічного кремнію, що демонструють нижчу ефективність, зазвичай мають правильну квадратну форму (рис. 1.5, б), оскільки отримуються методом лиття в прямокутні форми.

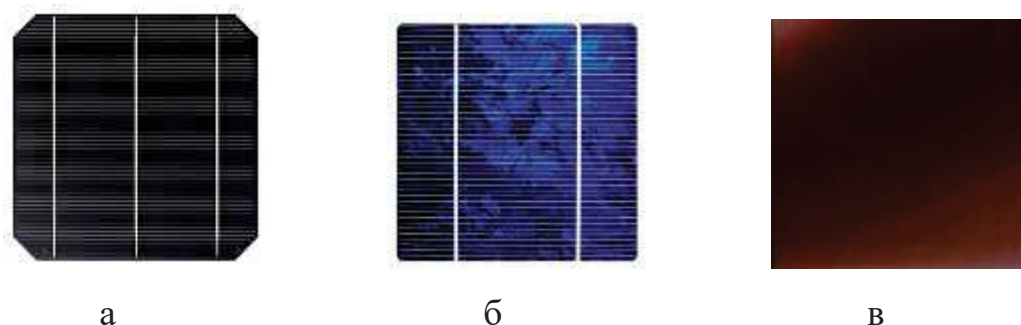


Рисунок 1.5 – Фотоелектричні елементи виготовлені: а) з монокристалічного; б) полікристалічного кремнію; в) з аморфного кремнію

Сонячні елементи, виготовлені з аморфного кремнію, виявляють вищу стійкість до підвищених температур, тому їх енергоефективність у надзвичайно спекотну погоду залишається стабільною, на відміну від елементів на основі полі- або монокристалічного кремнію.

Характерною особливістю полікристалічних елементів є зерниста структура поверхні, яка візуально вирізняє їх серед монокристалічних аналогів.

Ефективність поглинання сонячної енергії фотоелементом значною мірою визначається кутом падіння сонячного випромінювання на його поверхню. Максимальне засвоєння енергії відбувається при перпендикулярному освітленні, тобто за кута падіння променів 90° . У випадках, коли світло надходить під гострим кутом - менше ніж 30° - спостерігається значне зростання відбиття, що знижує кількість енергії, яка потрапляє до активного шару елемента, і, відповідно, зменшує ефективність його роботи (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Ефективність роботи сонячного елемента, залежно від кута нахилу відносно Землі

Протягом світлового дня Сонце рухається по небесній сфері в площині, що є паралельною до небесного екватора. Водночас протягом року положення цієї площини змінюється залежно від кута екліптики — кута між площиною небесного екватора та напрямком на Сонце у його найвищому положенні на небі в певний день. У зимовий період Сонце підіймається над горизонтом на меншу висоту, що призводить до зменшення кута падіння сонячних променів, а отже — до зниження ефективності поглинання енергії сонячними елементами.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Саме тому для забезпечення максимальної ефективності роботи сонячних батарей доцільно використовувати спеціальні системи орієнтації — трекінгові системи, які змінюють положення фотопанелей відповідно до руху Сонця. Такі системи стежать за положенням світила над горизонтом і автоматично коригують кут нахилу панелі у двох площинах, забезпечуючи її орієнтацію на найкращий кут освітлення протягом усього дня. Ці механізми відомі як системи відстеження положення Сонця.

1.3 Стан і тенденції використання сонячної енергетики

У світі спостерігається стійке зростання встановлених потужностей сонячних електростанцій.

Відповідно до даних IRENA та IEA:

- станом на 2024 рік загальна потужність фотоелектричних установок перевищує 1 200 ГВт;
- основними лідерами є Китай, США, Індія, Німеччина та Японія;
- вартість 1 Вт встановленої потужності зменшилася у десятки разів за останні 15 років;
- розвиваються домашні системи, сонячні ферми, мікромережі та інтеграція фотоелементів у будівельні конструкції (BIPV);

Поширюється енергозбереження та накопичення енергії — поєднання фотоелементів із акумуляторами.

В Україні темпи розвитку сонячної енергетики суттєво зросли до 2022 року, але сповільнилися через війну. Проте зберігається інтерес до автономних і резервних систем живлення, зокрема в сільській місцевості, в умовах нестабільного енергопостачання.

1.4 Аналіз існуючих лабораторних стендів для дослідження сонячних елементів

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У багатьох закладах освіти для демонстрації та дослідження характеристик фотоелементів застосовуються лабораторні стенди.

Основні цілі щодо їх використання:

- дослідження вах фотоелемента при різному освітленні;
- вивчення впливу температури та кута падіння світла на потужність;
- оцінка ефективності перетворення енергії;
- порівняння характеристик різних типів фотоелементів.

Типові стенди можуть включати:

- сонячний модуль (монокристалічний або полікристалічний);
- джерело світла із регульованою яскравістю (симулятор сонця);
- навантаження (змінне або фіксоване);
- вимірювальні прилади (вольтметр, амперметр, мультиметр);
- систему повороту модуля для зміни кута освітлення;
- інтерфейс для передачі даних до комп'ютера.

Недоліки типових стендів: Обмеження за кількістю типів елементів; Відсутність можливості симулювати реальні умови довкілля; Складність модифікацій конструкції.

Саме тому доцільним є розроблення універсального модульного стенда, який дозволяє:

- проводити експерименти з різними типами сонячних елементів;
- враховувати вплив температури, навантаження та інсоляції;
- використовувати цифрові датчики для точного вимірювання.

Враховуючи всі рекомендації по вибору елементів, які використовуються для комплектації сонячних електростанцій зробимо висновок, що їх потрібно ретельно досліджувати, щоб дати висновок про їх ефективність в різних режимах роботи та конструктивних поєднаннях.

На кафедрі машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем функціонує лабораторна установка для дослідження характеристик сонячних елементів і батарей, загальний вигляд якої наведено на рисунку 1.7.

Конструкція установки включає такі основні компоненти: Основа установки (1) зі стійкою (2) для підтримки вертикальної конструкції; Стержень для кріплення джерела світла (3); Платформа з закріпленими сонячними батареями (4); Тримач стійки (5), що забезпечує механічну стійкість; Кутомір для регулювання положення джерела світла (6); Освітлювальний елемент (прожектор) (7) — імітатор сонячного випромінювання; Комутуючий пристрій (8) для підключення та перемикання елементів схеми; Лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) (9) — джерело живлення прожектора з можливістю регулювання напруги; Міліамперметр (10) для вимірювання струму; Магазин опорів (11) — змінне електричне навантаження; Люксметр (12) для вимірювання рівня освітленості; Мультиметр (13) — універсальний засіб вимірювання електричних параметрів; Сонячна батарея (14), що перетворює світлову енергію на електричну; Кутомір сонячної батареї (15) — пристрій для зміни кута нахилу фотопанелі відносно джерела світла. [4].



1 – опорна база установки; 2 – вертикальна стійка конструкції; 3 – тримач для закріплення джерела освітлення; 4 – основа з встановленими сонячними батареями; 5 – кронштейн для фіксації стійки; 6 – пристрій для визначення кута на-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

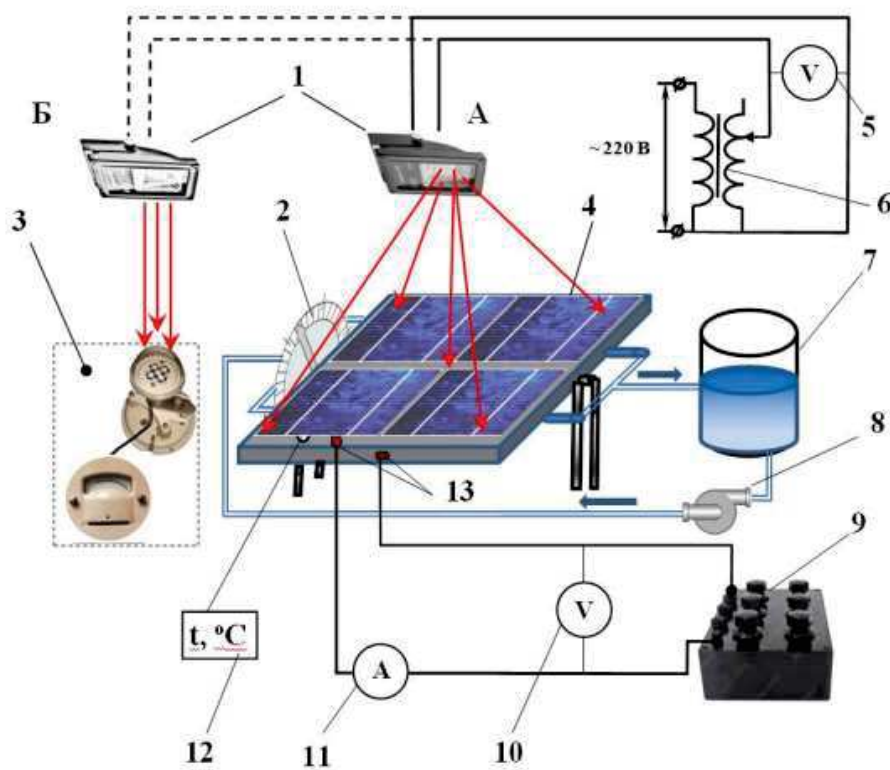
17

фотоелектричний модуль; система охолодження для стабілізації температурного режиму; механізм регулювання кута нахилу модуля; піранометр моделі М-80М для вимірювання освітленості; комплекс вимірювальних приладів[5].

Як штучне джерело світла в установці застосовується прожектор із галогенною лампою потужністю 500 В, призначеною для роботи при напрузі 220 В. Підключення здійснюється через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР), який забезпечує можливість плавного регулювання інтенсивності освітлення сонячного модуля. [5].

У ході проведення експериментів імітатор сонячного світла може перебувати у двох положеннях: положення А - робочий режим, у якому випромінювання спрямоване на поверхню фотоелектричного модуля, імітуючи дію Сонця; положення Б - режим контролю інтенсивності освітлення, за якого проводяться вимірювання світлової енергії, що падає на модуль.

Ступінь освітленості позначається при допомозі піранометра типу М-80М, шляхом зчитування значень ведеться через гальванометр типу ГСА-1.



1 – джерело штучного освітлення, яке імітує сонячне випромінювання;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

- 2 – механізм регулювання кута нахилу сонячного модуля;
 3 – прилад для вимірювання інтенсивності падаючого світлового потоку;
 4 – фотомодуль (сонячна панель); 5, 10 – вольтметри для вимірювання напруги;
 6 – лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) для регулювання яскравості освітлення;
 7 – резервуар системи охолодження сонячного модуля;
 8 – насос для циркуляції охолоджувальної рідини; 9 – магазин опорів типу РЗЗ для створення навантаження;
 11 – амперметр для вимірювання сили струму;
 12 – температурний датчик; 13 – клеми для підключення зовнішнього навантаження до сонячного модуля.

Рисунок 1.8 - Схема експериментальної установки [5]

Фотовольтаїчний модуль складається з чотирьох полікристалічних елементів розміром 125×125 мм кожен, розміщених на алюмінієвій основі, обладнаній водяною системою охолодження. Конструкція стенду передбачає можливість зміни кута нахилу фотоелектричних модулів (ФЕМ) для дослідження їх роботи при різних кутах падіння світла [5].

Основні електричні характеристики одного фотоелектричного перетворювача (ФЕП): номінальна напруга становить 0,5 В, напруга холостого ходу — 0,62 В, а коефіцієнт корисної дії досягає 15%.

Система водяного охолодження реалізована за схемою з абсорбером типу «лист–труба», конструкція якого показана на рисунку 12. Абсорбер виконаний у вигляді алюмінієвої пластини, крізь яку проходять дві паралельні трубки, розміщені по центральній осі ФЕП [5].

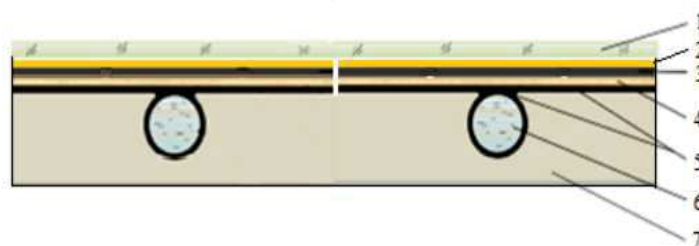


Рисунок 1.9 - Система охолодження елементів з абсорбером типу «листок-труба»: 1 – світлопрозоре покриття; 2 – з'єднуючий матеріал; 3 – фотоелектрич-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
20

ний елемент; 4 – теплопровідна електроізоляційна з'єднуюча речовина; 5 – тепловий абсорбер типу «лист-труба»; 6 – теплоносій (вода); 7 – теплоізоляційний матеріал [5].

Під час дослідження характеристик сонячного модуля збирається електричне коло, яке містить амперметр та вольтметр для вимірювання струму і напруги відповідно. В якості змінного електричного навантаження в схемі використовується магазин опорів, що дозволяє регулювати величину опору в колі та досліджувати залежність параметрів модуля від навантаження.

Даний стенд має ряд переваг та недоліків. Він має габаритну конструкцію, включає багато компонентів, які використовують для діагностування сонячних елементів в різних режимах роботи. Наявність охолодження в стенді дає можливість досліджувати елементи при високих температурах. Проте стенд також є громіздким та не являє собою цілісну конструкцію.

Існує стенд лабораторний «Гібридна система Сонце та Вітер» GES-500 промислового виробництва для навчальних цілей.

Гібридна навчальна система GES-500, що поєднує в собі вітрову та сонячну енергетику, включає в свій склад такі основні компоненти: сонячну панель, акумуляторний модуль, МРРТ-контролер заряду, інвертор постійного/змінного струму, мережевий інвертор, вітрогенератор, модуль моніторингу параметрів вітрової енергії, трифазний випрямляч, гібридний контролер вітрової та сонячної енергії, модуль навантаження, а також систему вимірювальних приладів (лічильники). Інтеграція усіх перелічених модулів забезпечує функціонування установки як повноцінної навчальної платформи, призначеної для проведення практичних досліджень у сфері використання сонячної, вітрової та комбінованої (гібридної) енергії. Це дозволяє студентам глибше засвоїти принципи роботи як мережевих, так і автономних енергосистем, вивчити конструкцію та функціонування вітроенергетичних установок, а також отримати практичні навички для подальшого розроблення прикладних енергетичних рішень. [6].



Рисунок 1.10 – Стенд лабораторний
«Гібридна система Сонце та Вітер» GES-500

Особливості стенда «Гібридна система Сонце та Вітер» GES-500:

1. Програмне забезпечення дозволяє не лише візуалізувати, але й зберігати експериментальні дані.

2. Завдяки цифровому індикатору користувач має змогу відстежувати точні робочі параметри системи в реальному часі.

3. Усі входні та вихідні клеми оснащені захисними заглушками, що забезпечує безпечне та зручне підключення провідників під час проведення експериментів.

3. Система містить захист від зворотної полярності, який запобігає пошкодженню компонентів у разі неправильного підключення або подачі зворотної напруги.

4. Джерело штучного освітлення дає змогу змінювати інтенсивність світлового потоку для моделювання різних умов сонячного випромінювання.

5. Сонячна панель встановлена на регульованому кронштейні, що дозволяє змінювати кут нахилу для дослідження роботи в різних положеннях відносно джерела світла. [6].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Перелік лабораторних робіт, що можуть виконуватися на стенді[6].:

Система виробництва сонячної енергії:

1. Тест перетворення сонячної фотоелектричної енергії;
2. Випробування характерної кривої сонячного елемента;
3. Вплив температури на сонячний елемент;
4. Сонячні елементи, на які впливають криві різних кутів освітлення;
5. Ефективність і максимальна потужність сонячного елемента;
6. Автономна генерація сонячних батарей;
7. Генерація сонячних батарей-вуличний ліхтар;
8. Зв'язок із генерацією сонячних батарей [6].

Вітроенергетична система[6].:

1. Експеримент за швидкістю вітру вітряної турбіни;
2. Відкритий ланцюг і експеримент з навантаженням вітряної турбіни;
3. Коефіцієнт використання енергії вітру вітряної турбіни;
4. Експеримент із кривої потужності вітряної турбіни;
5. Автономна вітроенергетика;
6. Зв'язок із мережею виробництва вітрової енергії [6].

Додаткові лабораторні роботи[6].:

1. Ефективність перетворювача постійного струму в змінний;
2. ККД і ефект ізольованості мережевого інвертора;
3. Гібридна вітро-сонячна автономна система;
4. Гібридна вітро-сонячна система вуличного освітлення;
5. Гібридна система вітрової та сонячної енергії, пов'язана з енергосистемою [6].

Даний стенд має переваги у тому, що має широкий спектр виконання експериментальних досліджень в галузі альтернативної енергетики. Але він дуже коштовний і не всі заклади освіти мають змогу придбати такий стенд для навчальних занять.

Висновки до розділу 1.

У ході проведеного аналізу літературних джерел було досліджено основи функціонування сонячних елементів, розглянуто їх принцип роботи, зокрема фотоелектричний ефект як основу генерації електроенергії з сонячного світла. Було здійснено класифікацію фотоелементів за типом матеріалу та конструкцією, що дозволило обґрунтовано обрати відповідний тип для дослідного стенда. Окрему увагу приділено сучасним тенденціям використання сонячної енергетики у світі та в Україні. Проведено огляд існуючих лабораторних стендів, що дозволило виявити недоліки і переваги конструкцій, які враховано при проектуванні власної установки.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 Розробка лабораторної установки для дослідження сонячних елементів

2.1 Формування вимог до конструкції лабораторної установки

Формування вимог до стенда починається з визначення його основної функції - створити умови для вимірювання характеристик сонячних фотоелементів у лабораторних умовах.

Основні вимоги включають:

Функціональні вимоги: можливість підключення та заміни різних типів сонячних елементів (моно- і полікристалічні, аморфні); вимірювання напруги холостого ходу, струму короткого замикання, робочої потужності, ККД; зміна кута нахилу сонячного модуля для оцінки залежності від інсоляції; симуляція сонячного освітлення за допомогою джерел штучного світла.

Електричні та метрологічні вимоги: робоча напруга: до 20 В; струм: до 5 А; точність вимірювання: не гірша ніж $\pm 2\%$; наявність вбудованих приладів для вимірювання основних параметрів (вольтметри, амперметри, мультиметри, датчики освітленості).

Ергономічні вимоги: компактність та мобільність конструкції; зручний доступ до елементів для заміни та підключення; наочність розташування панелей, дисплеїв, елементів керування.

Вимоги до техніки безпека: захист від короткого замикання, перенапруги; заземлення; механічна стабільність.

2.2 Вибір фотоелементів та елементної бази

Для реалізації експериментальної установки було обрано такі типи фотоелементів:

Моно- та полікристалічні кремнієві панелі, що найбільш розповсюджені та ефективні для навчальних та лабораторних цілей (ККД до 20%);

Аморфні тонкоплівкові фотоелементи - для демонстрації залежності ККД

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

від типу матеріалу.

Для складання лабораторного установки було обрано елементну базу компонентів та вимірювальних пристроїв. Далі приведемо перелік елементів у складі установки, їх функціональне призначення та ілюстративні матеріали.

1. Світлове джерело (лампа / сонячний симулятор).

Живиться через автотрансформатор (регулятор), що забезпечує зміну інтенсивності світла (яскравості).



Рисунок 2.1 – Джерело світла (сонячний симулятор)



Рисунок 2.2 - Автотрансформатор (регулятор)

2. Датчик освітленості (люксометр)

Розташований біля сонячного елемента, вимірює освітленість. Використовується для калібрування і контролю умов випробування.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
26



Рисунок 2.3 – Датчик освітленості (люксометр)

3. Сонячний елемент (моно/полікристалічний). Різновиди та характеристики приведені у розділі вище.

4. На виході сонячний елемент підключений до амперметра - для вимірювання струму (у серійному колі) та вольтметра - паралельно, для вимірювання напруги. Можна також використовувати мультиметр, у якому є всі можливості для вимірювання параметрів, струму, напруги, потужності.



Рисунок 2.4 – Амперметр та вольтметр для вимірювання енергетичних параметрів

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
27

5. Змінний навантажувальний резистор або реостат

Для дослідження $I-V$ характеристик змінюється величина навантаження.



Рисунок 2.5 – Змінний навантажувальний резистор

6. Система збору даних (АЦП → комп'ютер)

Аналогові сигнали (струм, напруга, освітленість) надходять на АЦП і далі в комп'ютер для побудови кривих та аналізу



Рисунок 2.6 – Система збору даних (АЦП → комп'ютер)

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

28

Канали для проходження сигналів та взаємозв'язки з елементами системи в лабораторній установці:

- енергія світла від джерела → сонячний елемент.
- електрична енергія від елемента → через амперметр → навантаження резистора → вольтметр.

– сигнали (Lux, I, V) → до АЦП → комп'ютер.

До схеми можна додати такі доповнюючі елементи:

- калібрувальний сонячний елемент — для перевірки рівня освітленості (особливо з сонячним симулятором).
- температурний датчик — часто додається, оскільки температура сильно впливає на характеристики рв.
- темна камера або екран — для виключення стороннього освітлення і стабільності умов .

Приведемо узагальнену структурну схему з врахуванням всіх компонентів та зав'язків між ними. Схема показана на рисунку 2.7.

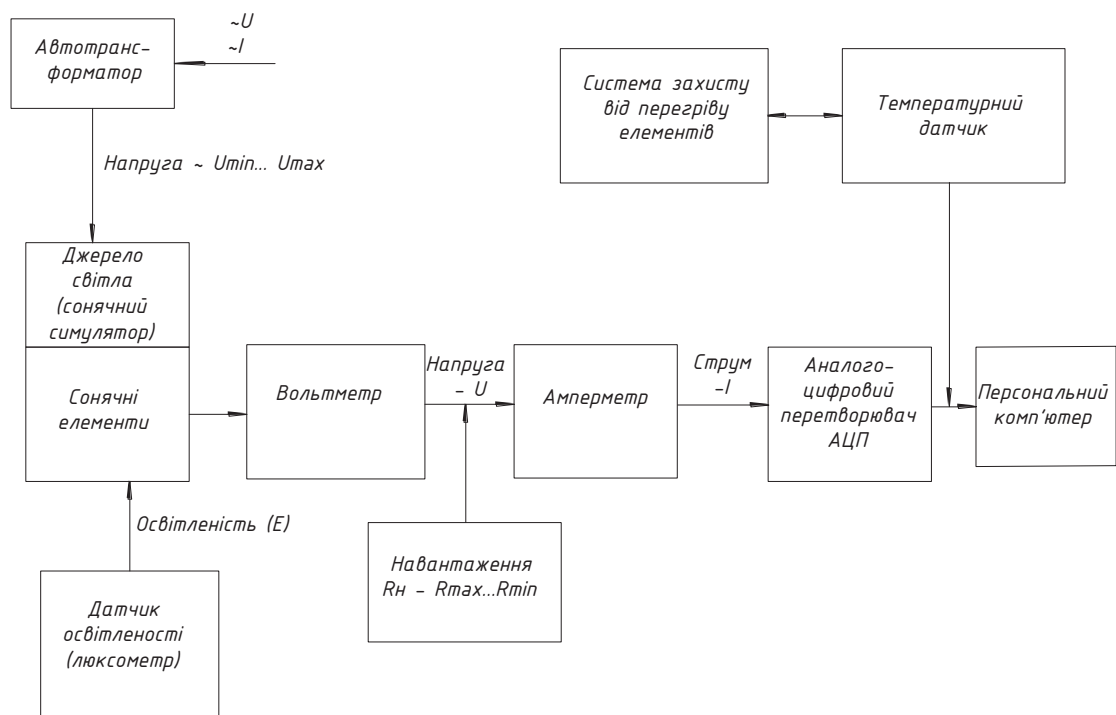


Рисунок 2.7 – Структурна схема установки для дослідження побутових сонячних елементів

Для ефективнішої роботи установки та чистоти експериментальних вимірювань необхідно врахувати наступні рекомендації:

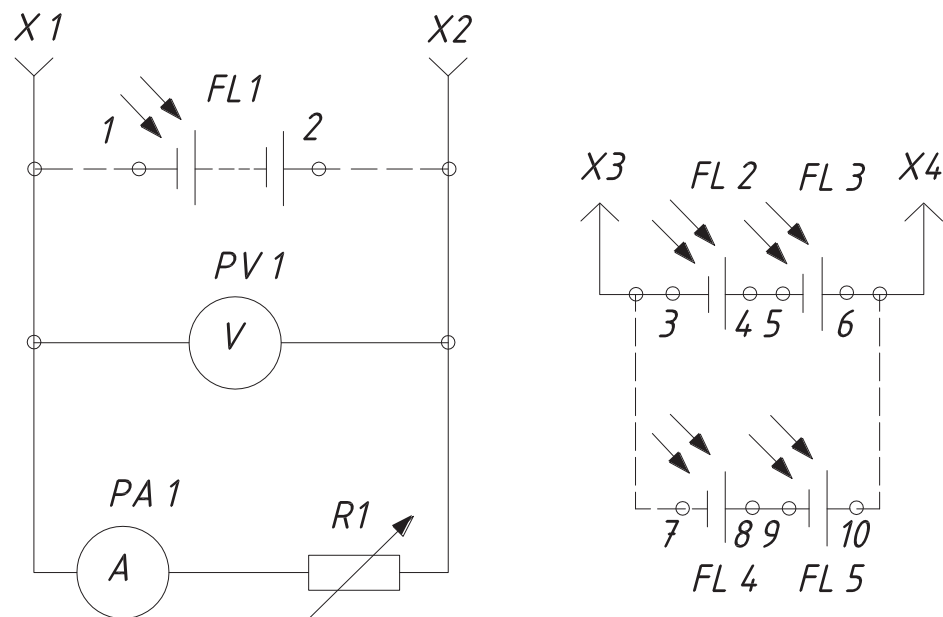
1. Поміщати всю установку у темну ізоляційну коробку, щоб уникнути зовнішнього світла.
2. Використовувати змінний резистор для побудови повної I–V характеристики.
3. Калібрувати навантаження: зіставляйте освітленість (lux) із відкритою напругою (U) для відтворюваності експериментів .
4. Вмикати температурний моніторинг, особливо для тривалих вимірювань.
5. Використовувати АЦП з принаймні 12-бітною роздільною здатністю для точної реєстрації даних.

2.3 Розробка електричної принципової схеми

Принципова електрична схема стенда передбачає (рис. 2.8):

- паралельне/послідовне з'єднання фотоелементів для дослідження характеристик;
- лінії вимірювання: підключення до вольтметра та амперметра;
- наявність перемикачів режимів: навантаження (через активне навантаження) / холостий хід / коротке замикання;
- вимірювання освітленості за допомогою світлових датчиків (фоторезистори або цифрові сенсори на кшталт bh1750);
- захисні елементи: запобіжники, обмежувачі струму;

Блок живлення для допоміжних пристроїв (якщо є освітлення або система керування).



FL1 - сонячна батарея; *FL2...FL5* - сонячні елементи; *PV1* - вольтметр; *PA1* - амперметр; *R1* - десятичний магазин опорів; *X1...X4* - з'єднувальні елементи

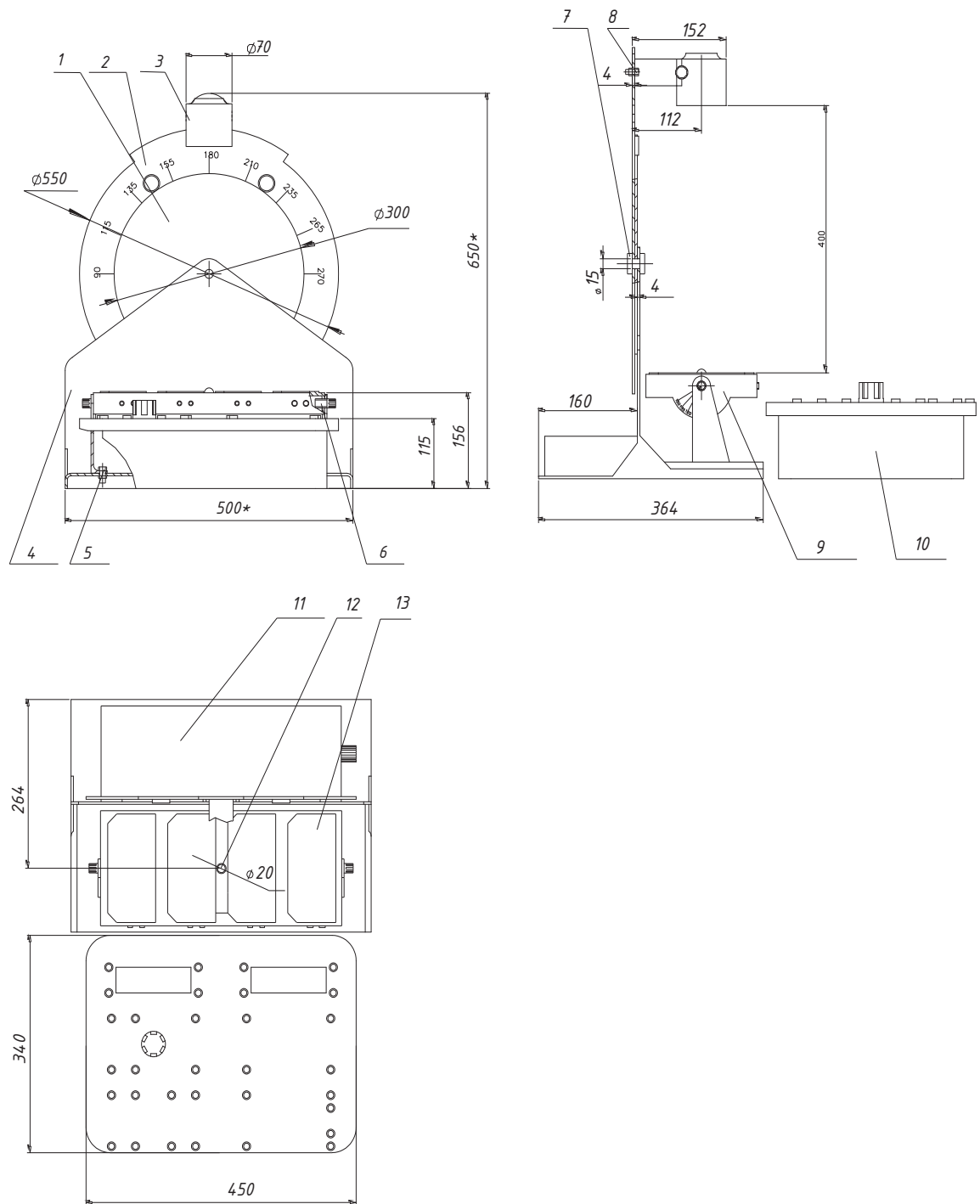
Рисунок 2.8 – Схема електрична підключення для дослідження роботи фотовольтаїчних елементів

Можливе включення Arduino з АЦП для збору даних із фотоелементів, подальшого виведення на дисплей або ПК.

2.4 Конструктивна схема стенда

З врахуванням розмірів компонентів робимо компоновання стенда у системі SolidWorks. Ця програма дає змогу підбирати елементи, розміщувати їх на площинах, робити складальні креслення та викреслювання окремих деталей. Загальний вигляд стенда показаний на рисунку 2.9 та у графічній частині [БРМА 25.00.00.000В3].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



- 1 - кріплення корпусу; 2 - вимірювальна шкала; 3 - лампа-сонячний симулятор;
 4 - корпус; 5,6,8 – кріпильні елементи; 7 - кріплення шкали; 9 - корпус елементів
 10 - вимірювальний стенд; 11 – блок живлення; 12 – люксометр;
 13 - сонячні елементи

Рисунок 2.9 - Загальний вигляд установки для дослідження побутових сонячних елементів

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

32

Установка для дослідження побутових сонячних елементів умовно поділений на три функціональні зони:

1. Робоча площа для встановлення сонячних панелей

Ця зона призначена для розміщення та фіксації фотоелектричних елементів 13 (рис. 2.9), а також для забезпечення можливості зміни умов їх освітлення. Регульована платформа 9 дозволяє змінювати кут нахилу сонячних панелей, імітуючи різні положення елемента, що важливо для вивчення впливу кута падіння променів. Фіксатори для модулів (позиції 5, 6) забезпечують надійне закріплення панелей у вибраному положенні. Світловідбиваючий/затемнювальний екран може використовуватись для створення контрольованих умов освітлення (наприклад, часткове затінення).

2. Електронний модуль вимірювання

Цей блок є центральним елементом для збору та відображення вимірюваних даних. Корпус вимірювального стенду 10 вміщує електронні елементи, включаючи вольтметри, амперметри, перемикачі. Панель керування має перемикачі, індикатори та цифрові дисплеї, які дають змогу в реальному часі спостерігати параметри струму, напруги, освітленості.

Люксометр 12 використовується для точного вимірювання рівня освітленості поверхні сонячного елемента, що дозволяє будувати залежності між освітленням і електричними характеристиками.

Вимірювальна шкала (2) може бути частиною механізму зміни положення джерела світла або кутового положення панелей.

3. Джерело штучного світла

Цей модуль імітує сонячне випромінювання в лабораторних умовах. Для цього існує шкала 2, щоб показати положення сонця над горизонтом.

Лампа-сонячний симулятор 3 - галогенова або інша лампа, яка створює потік світла, максимально наближений до природного сонячного спектру. Лампа встановлена на кріпленні з можливістю зміни висоти лампи на елементом (1, 7) - це дозволяє регулювати інтенсивність освітлення в зоні розміщення панелей.

Керування яскравістю здійснюється через блок живлення 11 через автотрансформатор (АТР), що забезпечує регулювання напруги подачі на лампу.

Каркас установки: анодований алюміній або ПВХ для легкості і мобільності. Уся конструкція має бути придатною до транспортування (на коліщатах або модульна).

Загальна взаємодія модулів установки. Світло від симулятора 3 падає на сонячні елементи 13, які перетворюють його в електричну енергію. Залежно від кута нахилу та інтенсивності освітлення змінюються параметри струму й напруги, що вимірюються через вимірювальний стенд 10, а дані фіксуються на дисплеях керуючої панелі. Рівень освітленості контролюється за допомогою люксметра 12, що дозволяє проводити повноцінний аналіз ефективності роботи сонячних елементів у різних умовах.

Технічні характеристики установки:

1. Типи сонячних елементів - моно- та полікристалічні кремнієві фотоелементи
2. Робоча площа фотоелемента 200 см² / 4 шт.
3. Діапазон напруги на виході 0... 10В
4. Діапазон струму 0...46 мА
5. Максимальна вихідна потужність 123 мВт (розраховано: $P = U \times I_{max}$)
6. Регулювання інтенсивності освітлення. За допомогою лабораторного автотрансформатора (0...250 В)
7. Джерело світла - лампа розжарювання / світлодіодна / галогенна
8. Діапазон освітленості 0...3000 лк (залежно від лампи та відстані)
9. Вимірювання напруги - вольтметр, точність ± 0.01 В
10. Вимірювання струму - амперметр, точність ± 0.01
11. Вимірювання освітленості - люксметр (модель, діапазон, точність)
12. Система збору даних АЦП + USB-підключення до ПК /Arduino + програма обробки
13. Тип навантаження - змінне резистивне навантаження (реостат) або фі-

ксоване навантаження

14. Температурний діапазон дослідження За потреби: +15...+40 °С (якщо передбачено контроль температури)

Розміри установки 710 × 450 × 650, мм

Матеріал основи - алюміній /сталь /фанера з антивідблисковим покриттям

Маса установки 12,5 кг

2.5 Безпека експлуатації

Під час проєктування стенда передбачено ряд заходів для забезпечення безпеки:

– електрична безпека: використання малонапружених джерел (до 20 в); ізоляція провідників, наявність запобіжників; маркування проводів та елементів для зниження ймовірності неправильного підключення.

– тепловий захист: вентиляція корпусу електроніки; термостійке розміщення джерел світла; захист від перегріву елементів під дією ламп.

– механічна безпека: відсутність гострих країв; надійне кріплення панелей; фіксатори для рухомих частин.

– організаційні заходи: наявність інструкції з експлуатації; проходження інструктажу з техніки безпеки студентами; вимірювання та фіксація температури модулів під час експериментів.

Висновки до розділу 2

У результаті аналізу було сформовано технічні та функціональні вимоги до конструкції лабораторного стенда. Враховуючи експлуатаційні умови та мету досліджень, здійснено обґрунтований вибір типу фотоелементів і супутньої елементної бази. Розроблено електричну принципову схему стенда, яка забезпечує можливість точного вимірювання вихідних параметрів сонячних елементів. Конструктивне виконання стенда передбачає зручність монтажу, зміну конфігу-

рацій і безпечну експлуатацію.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3 Методика проведення експериментальних досліджень

3.1 Програма випробувань

Програма випробувань є основним документом, що визначає послідовність, умови, тривалість та методи проведення експериментів. Вона розробляється з урахуванням цілей дослідження, специфіки обладнання та параметрів, які підлягають вивченню.

У даній роботі програма експериментальних досліджень включає:

- визначення електричних параметрів фотоелементів (напруги холостого ходу, струму короткого замикання, максимальної потужності);
- аналіз залежності вихідних характеристик фотоелемента від освітленості та температури;
- порівняння різних типів фотоелементів (моно- та полікристалічних, тонкоплівкових тощо);
- перевірка ефективності роботи елементів при різних видах підключення
- перевірка ефективності охолодження або використання фокусувальних дзеркал (за наявності);
- аналіз стабільності та повторюваності результатів при зміні положення сонячного модуля відносно сонця.

Кожен експеримент проводиться кілька разів для отримання статистично достовірних даних. Тривалість випробувань встановлюється з урахуванням змін інсоляції протягом дня.

Для кращої візуалізації покажемо способи підключення елементів в системі для отримання різних значень струму, напруги та визначення максимального значення потужності при певних способах підключення.

Сонячні елементи можуть з'єднуватись між собою трьома основними способами: послідовно, паралельно або у вигляді комбінованої (послідовно-паралельної) схеми. Кожен із цих варіантів має свої конструктивні особливості, що визначають рівень вихідної напруги та струму системи, а також відповідні

області застосування в залежності від типу споживача та технічних вимог до електроживлення. [18]

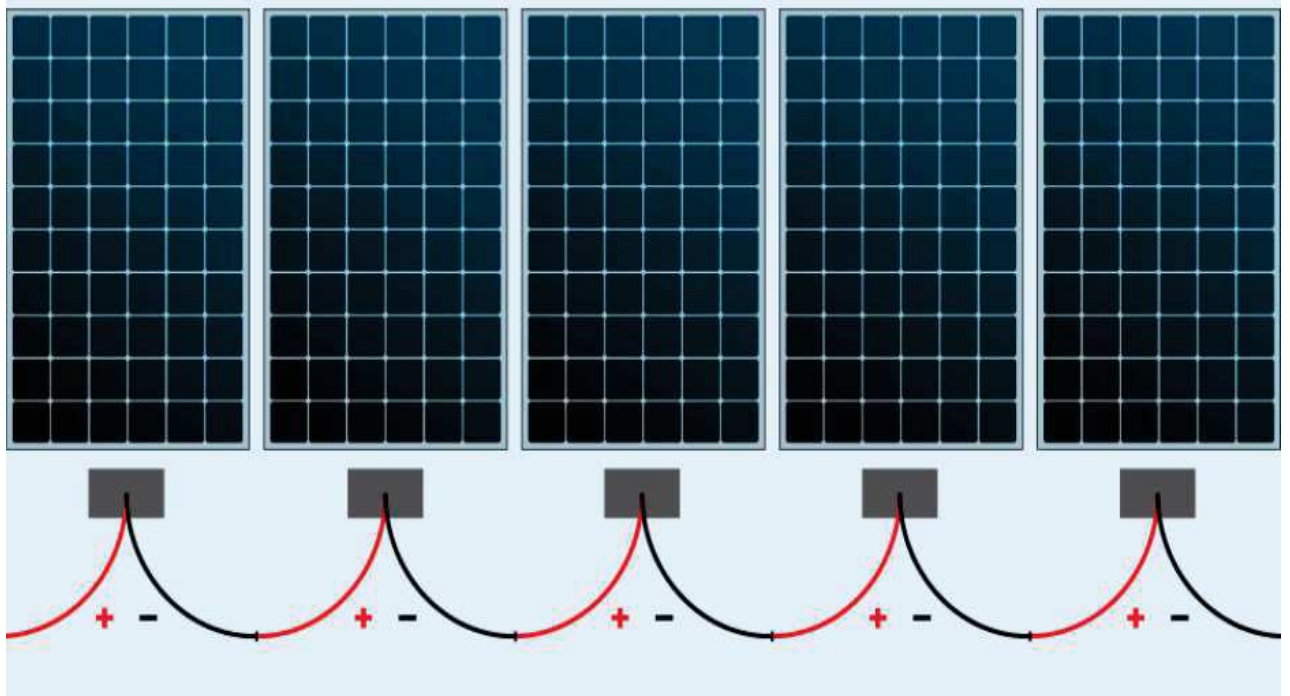


Рисунок 3.1 - Послідовне з'єднання сонячних елементів

У разі послідовного з'єднання сонячних модулів плюсовий вихід одного модуля з'єднується з мінусовим входом наступного, утворюючи замкнений електричний контур, по якому протікає струм.

Ключові особливості такої схеми підключення: напруги всіх модулів підсумовуються; сила струму залишається сталою і відповідає струму одного модуля; сумарна потужність системи дорівнює арифметичній сумі потужностей усіх з'єднаних в ланцюг модулів.

Приклад: якщо послідовно з'єднати два фотоелектричних модулі з номінальними параметрами 34,2 В та 11,7 А, отримаємо загальну напругу 68,4 В при постійному струмі 11,7 А [18].

Послідовне з'єднання є доцільним у тих випадках, коли необхідно добитись підвищеного рівня напруги для живлення інвертора. Більшість мережевих інверторів вимагають високої вхідної напруги (у діапазоні 180–600 В), яку забезпечують саме шляхом підключення відповідної кількості модулів у послідовну схему [18].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

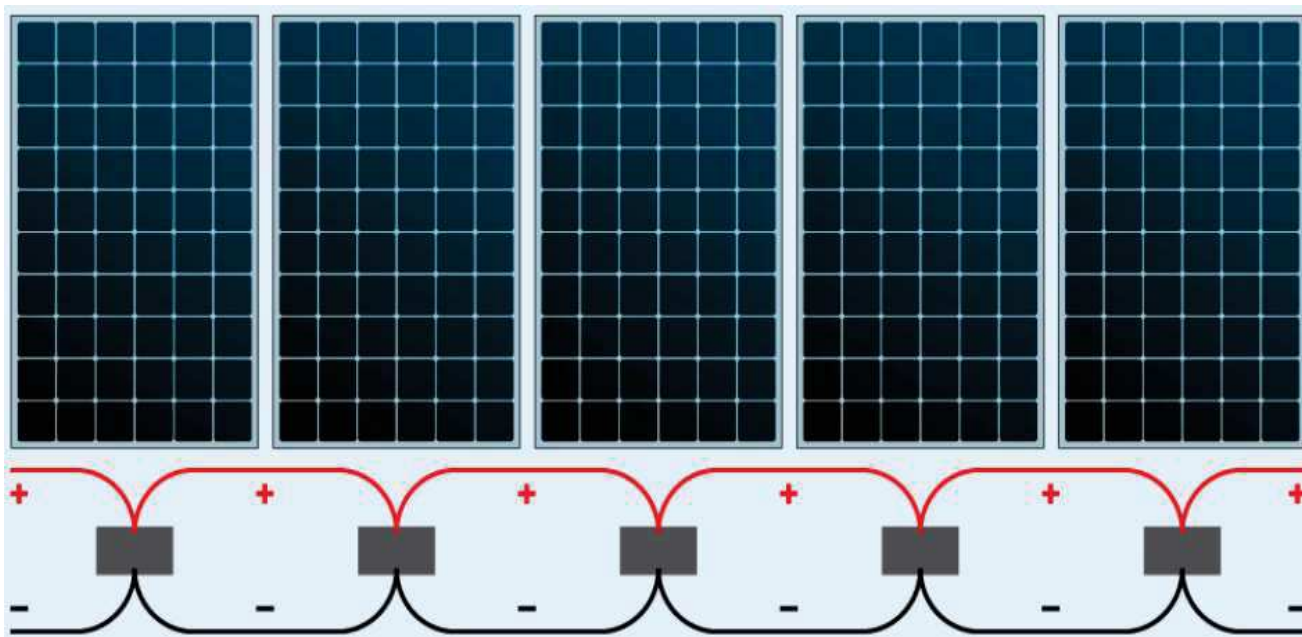


Рисунок 3.2 - Паралельне з'єднання сонячних панелей

У разі паралельного з'єднання сонячних модулів усі плюсові клеми з'єднуються між собою, так само як і всі мінусові. Це формує схему, в якій усі модулі працюють на спільну шину[18].

Характеристики паралельного підключення: напруга залишається постійною і відповідає напрузі одного модуля; сила струму додається, тобто підсумується струм від кожної панелі; загальна потужність системи є сумарною потужністю всіх підключених модулів[18].

Приклад: якщо паралельно з'єднати два сонячних модулі з напругою 34,2 В і струмом 11,7 А кожен, напруга залишиться на рівні 34,2 В, а загальний струм зросте до 23,4 А[18].

Паралельне з'єднання доцільне в системах, що працюють з низьковольтними інверторами або контролерами заряду, призначеними для великих струмів за відносно низької напруги. Окрім того, така схема має підвищену надійність: у разі виходу з ладу одного модуля решта продовжують працювати без перерв.

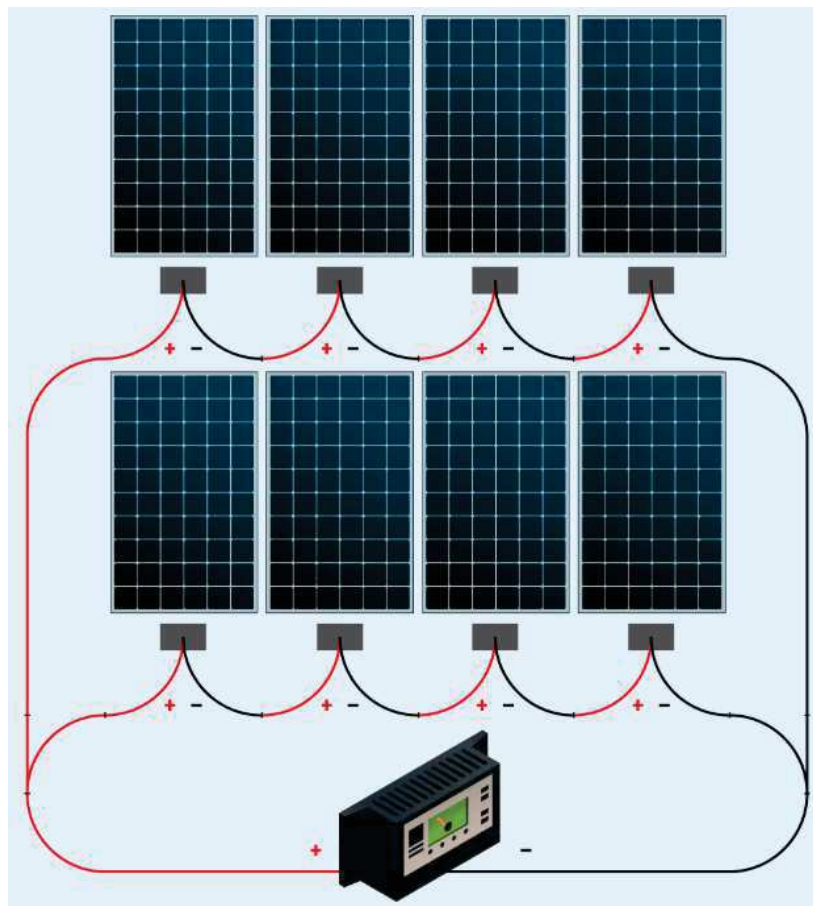


Рисунок 3.3 - Послідовно-паралельне підключення

Послідовно-паралельне з'єднання є комбінацією двох базових схем — послідовної та паралельної — і дозволяє ефективно регулювати як вихідну напругу, так і силу струму фотоелектричної системи. Такий підхід передбачає попереднє формування декількох послідовних ланцюгів панелей (стрінгів), які потім об'єднуються паралельно[18].

Цей тип з'єднання широко застосовується у потужних сонячних електростанціях, де необхідно досягти високих значень потужності при оптимальних параметрах для роботи інверторів[18].

Приклад: наявні 12 сонячних панелей можна згрупувати у 3 послідовні стрінги по 4 панелі в кожному. Після паралельного з'єднання цих стрінгів отримаємо такі результати: напруга одного стрінга: $34,2 \text{ В} \times 4 = 136,8 \text{ В}$, струм після паралельного об'єднання трьох стрінгів: $11,7 \text{ А} \times 3 = 35,1 \text{ А}$ [18].

Таким чином, вихідні параметри становитимуть 136,8 В і 35,1 А, що дозволяє узгодити систему з інверторами, оснащеними кількома МРРТ-входами, забезпечуючи ефективно відстеження точки максимальної потужності для кожної групи панелей [18].

3.2 Виконання вимірювань та обробка результатів

1. Налагоджуємо конструкцію лабораторної установки для дослідження роботи сонячних елементів та батарей [4].

2. Підключаємо елементи до лабораторної установки згідно електричної схеми (рис.2.8) для досліду роботи сонячної батареї *FL1*.

3. Десятинний магазин опорів *RI*, який застосовується як навантаження, переправляємо у значення мінімального опору. [4].

4. При допомозі поворотного механізму 2 встановлюємо освітлювач 3 під кутом 90° .

5. При допомозі системи 9 встановлюємо основу сонячного елемента під кутом 90° .

6. Вмикаємо освітлювач 3.

7. Змінюємо опір *RI* навантаження від мінімального до максимального значення, вносимо значення напруги, струму, опору навантаження та розрахованого за залежністю $P = U \cdot I$ значення у таблицю 3.1. Опір навантаження слід змінювати так, щоб переміна напруги на сонячній батареї була ув межах $0,2 \pm 0,01\text{В}$ [4].

8. На основі одержаних значень таблиці 3.1 будемо вольт-амперну (залежність $I = f(U)$) і навантажувальну характеристики для сонячної батареї (залежність $P = f(U)$).

Таблиця 3.1 – Залежність вихідної потужності сонячної батареї від навантаження

№ дослідю	Навантаження R_n , Ом	Напруга U , В	Струм I , мА	Потужність P , мВт
1	990	6,16	5	30,8
2	940	6	8	48
3	620	5,5	8,4	46,2
4	380	5	8,6	43
5	250	4,5	9,4	42,3
6	200	4	10	40
7	170	4	10,1	40,4
8	150	3,5	10,2	35,7
9	140	3	10,4	31,2
10	130	2,5	10,6	26,5
11	100	2,5	10,65	26,625
12	80	2	10,8	21,6
13	60	1,5	10,9	16,35
14	40	1	11	11
15	20	0,5	11,5	5,75

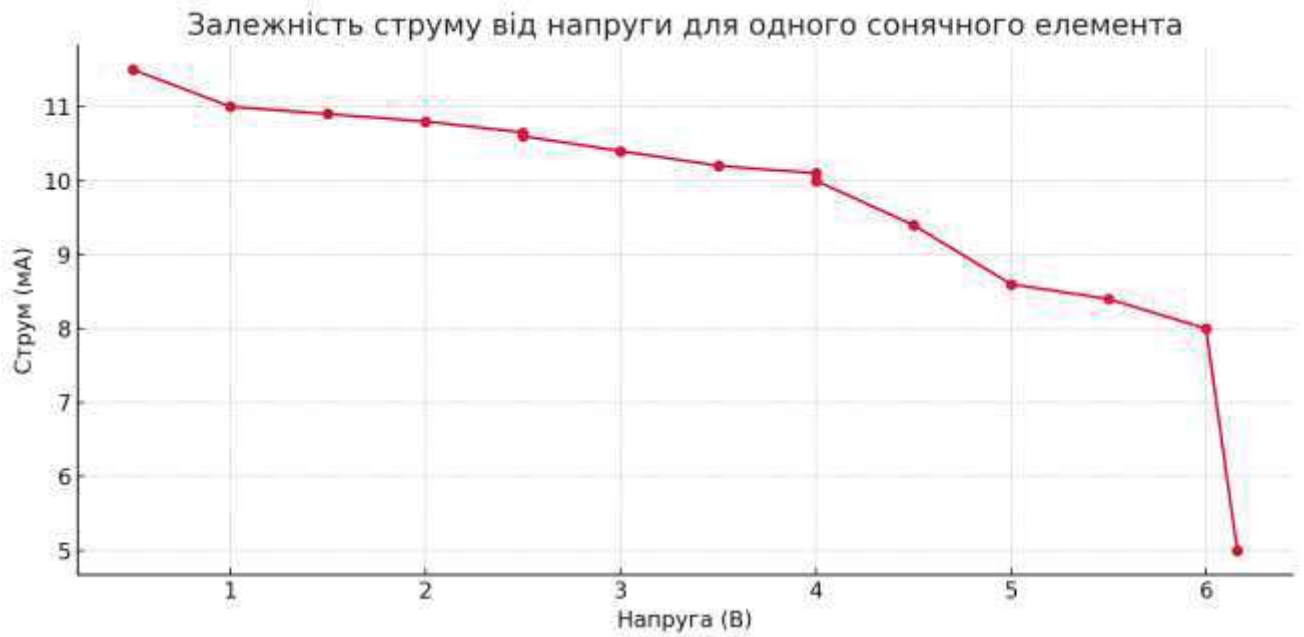


Рисунок 3.1 - Вольт-амперна характеристика (залежність $I = f(U)$)

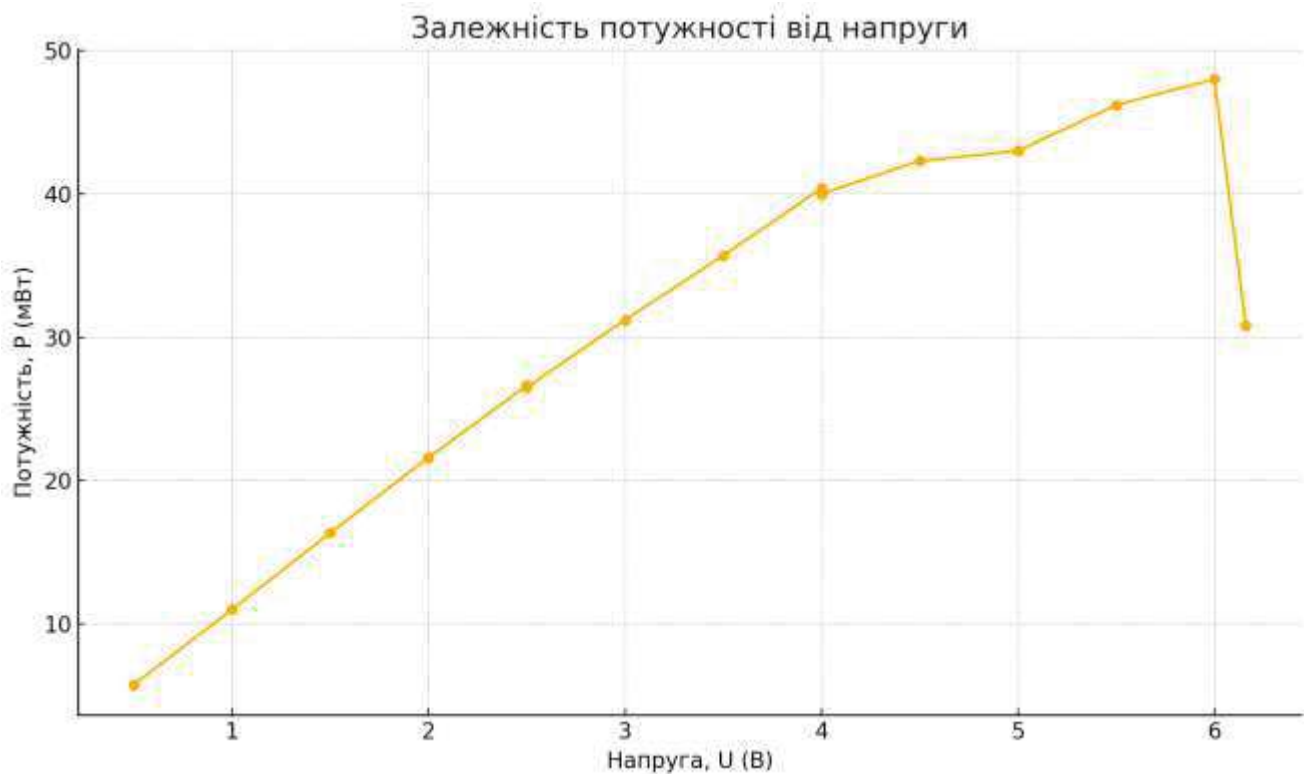


Рисунок 3.2 - Навантажувальна характеристики для сонячної батареї
(залежність $P = f(U)$)

9. За графіками вольт-амперної і навантажувальної характеристик знаходимо струм I_m та напругу U_m , які відповідають максимальному значенню потужності P_m , яка видається фотоелектричною батареєю на навантаження. $I_m = 8$ мА, $U_m = 6$ В, $P_m = 48$ мВт [4].

Вимірювання здійснюються відповідно до стандартних умов дослідження сонячної батареї (елемента), модуля батареї – густина потоку сонячного випромінювання 1000 Вт/м² і температура сонячних елементів 25 ± 2 °С [4].

10. На основі значень таблиці 3.1 визначається оптимальний опір навантаження R_m , який відповідає максимальній потужності [4]. $P_m \cdot R_m = 940$ Ом.
 $P_m = 48$ мВт

11. Змінюємо опір навантаження R_l до мінімального значення та визначаємо струм короткого замикання $I_{к.з.} = 11,5$ мА.

12. Від'єднуємо декадний магазин опорів RI до мінімального значення і визначити напругу холостого ходу $U_{х.х.} = 6,22$ В.

13. Проводимо порівняння значення [4]. $U_{х.х.} \cdot I_{к.з.}$ з $P_m = U_m \cdot I_m$.

На графіку показано залежність струму від напруги для одного сонячного елемента: при високій нарузі струм невеликий (елемент працює в режимі холостого ходу); при зниженні напруги струм зростає (режим короткого замикання — максимальний струм).

14. Встановлюємо на декадному магазині опорів визначене значення R_m , приєднуємо декадний магазин опорів RI . $R_m = 940$ Ом.

15. За допомогою механізму 2 і 9, змінюючи нахил панелі сонячної батареї від 90^0 до 15^0 з кроком 15^0 , занесимо значення напруги, струму і розрахованого значення потужності в таблицю.3.2 [4].

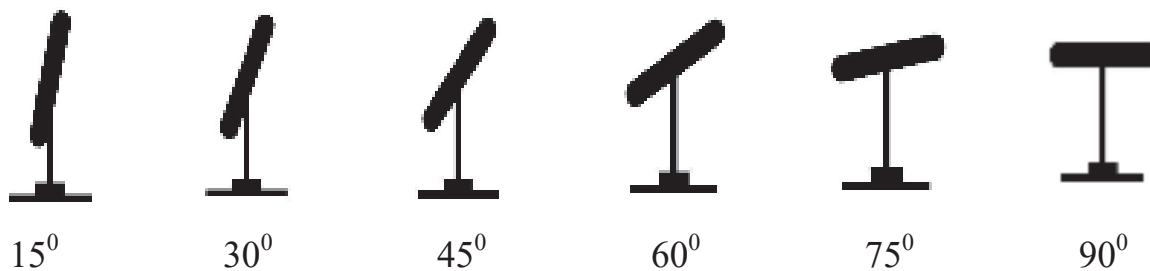


Рисунок 3.3 – Значення кутів нахилу панелі з фотоелектричним елементом

Таблиця 3.2 – Залежність вихідної потужності P сонячної батареї від кута нахилу

№ досліду	Кут нахилу φ°	Напруга $U, \text{В}$	Струм $I, \text{мА}$	Потужність $P, \text{мВт}$
1	90°	5,9	3,2	18,88
2	85°	5,85	3,2	18,72
3	60°	5,8	3,2	18,56
4	45°	5,8	3,2	18,56
5	30°	5,7	3,2	18,24
6	15°	5,6	3,2	17,92

16. На основі отриманих значень побудуємо залежність потужності від кута нахилу

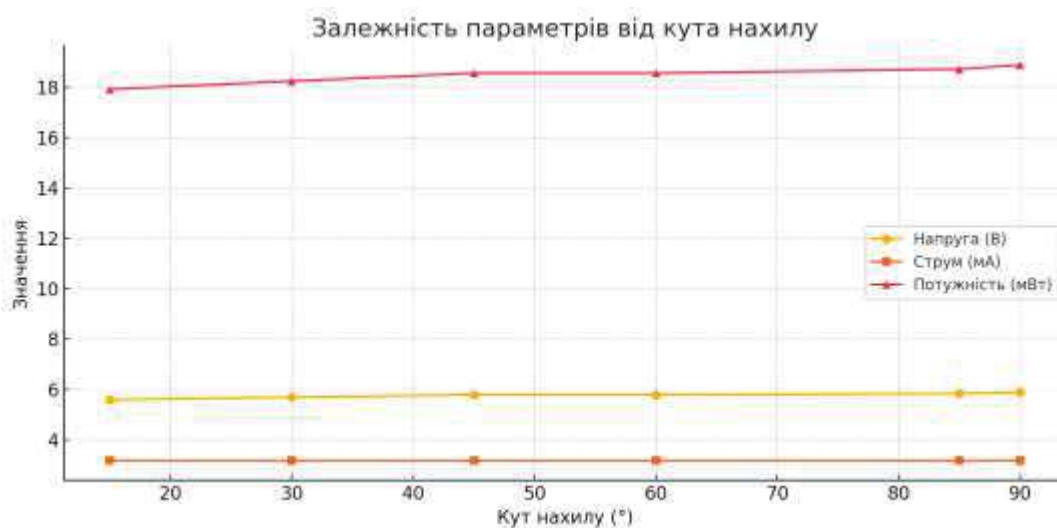


Рисунок 3.4 – Залежність потужності від кута нахилу

17. Встановлюємо кут нахилу панелі з фотоелектричною батареєю рівним 90° .

18. Вмикаємо освітлювач 3 та через автотрансформатор (блок живлення), встановлюємо робочу напругу так, щоб забезпечити щонайменше освітлення. Встановлюємо вимірювальний перетворювач люксметра поряд із штативом лабораторної установки [4].

19. Змінюємо освітленість за допомогою автотрансформатора від мінімального до максимального значення, заносимо значення напруги, струму та розрахункового значення потужності у таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Залежність вихідної потужності сонячної батареї від освітленості E .

№ дослідів	Освітленість E , лк	Напруга U , В	Струм I , мА	Потужність P , мВт
1	2130	5,9	3,2	18,88
2	960	5,4	3	16,2
3	560	3,8	2,5	9,5
4	170	2,8	2,2	6,16
5	30	1	2	2
6	15	0,2	1,95	0,39
7	10	0,14	1,8	0,252

Деякі значення освітленості E поверхні (поблизу Землі):

- сонячним промінням опівдні (на середніх широтах) – 100000 лк;
- сонячним промінням на відкритому місці в похмурий день – 1000 лк;
- сонячним промінням у світлій кімнаті (поблизу вікна) – 100 лк;
- на вулиці при штучному освітленні – до 4 лк;
- від повного Місяця – 0,2 лк;
- від зоряного неба в безмісячну ніч – 0,0003 лк.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

20. На базі одержаних значень будуюмо навантажувальну (залежність $P = f(E)$) характеристику для сонячної батареї.

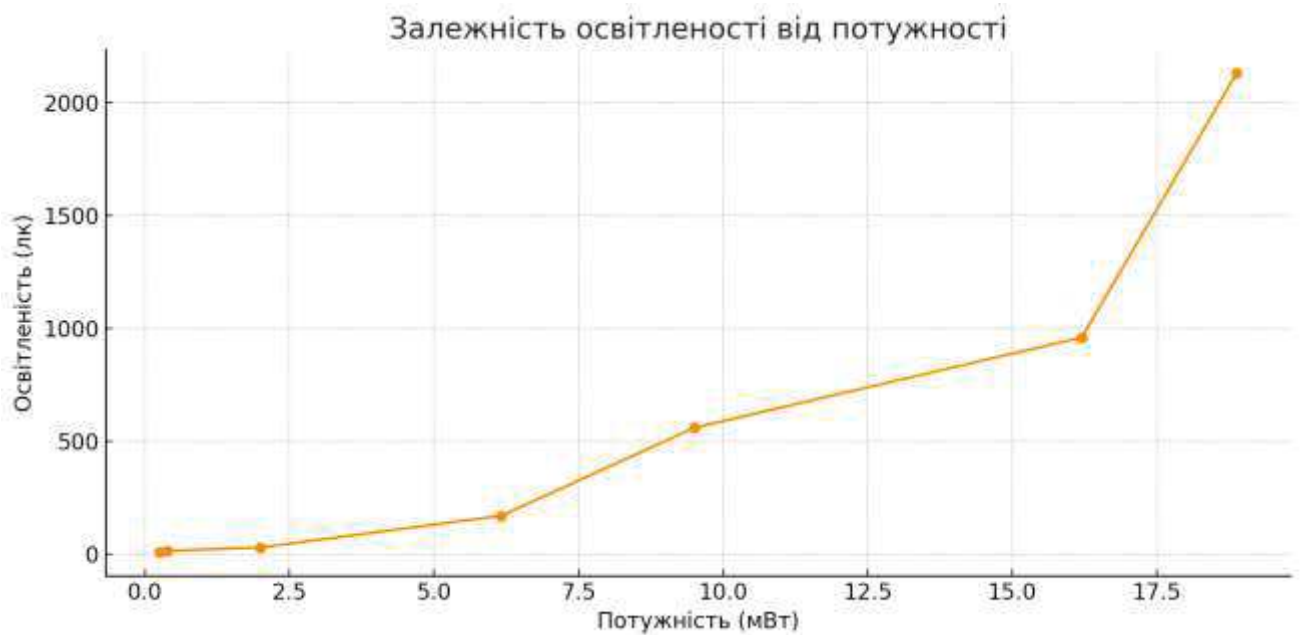


Рисунок 3.5 - Залежність освітленості (E, лк) від потужності (P, мВт)

21. За допомогою кріплення відводимо вбік від освітлювача панель сонячної батареї.

22. Приєднуємо замість сонячної батареї *FL1* сонячний елемент *FL2* виготовлений з полікристалічного кремнію. Проводимо дослідження згідно пунктів 3-13 і пунктів 18-20 [4].

23. Приєднуємо замість сонячного елемента *FL2* сонячний елемент *FL2*, виготовлений із монокристалічного кремнію. Проводимо дослідження згідно з пунктами 3-13 і пунктами 18-20 [4].

24. Проводимо порівняння технічних характеристик сонячних елементів, виготовлених з полікристалічного і монокристалічного кремнію[4].

25. З'єднуємо послідовно сонячні елементи *FL2-FL4* в батарею і проводимо дослідження згідно з пунктами 3-13 і пунктами 18-20 [4].

Таблиця 3.4 – Залежність вихідної потужності P сонячної батареї від навантаження при послідовному з'єднанні елементів

№ досліду	Навантаження R_n , Ом	Напруга U , В	Струм I , мА	Потужність P , мВт
1	990	24,64	5	123,2
2	940	24	8	192
3	620	22	8,4	184,8
4	380	20	8,6	172
5	250	18	9,4	169,2
6	200	16	10	160
7	170	16	10,1	161,6
8	150	14	10,2	142,8
9	140	12	10,4	124,8
10	130	10	10,6	106
11	100	10	10,65	106,5
12	80	8	10,8	86,4
13	60	6	10,9	65,4
14	40	4	11	44
15	20	2	11,5	23

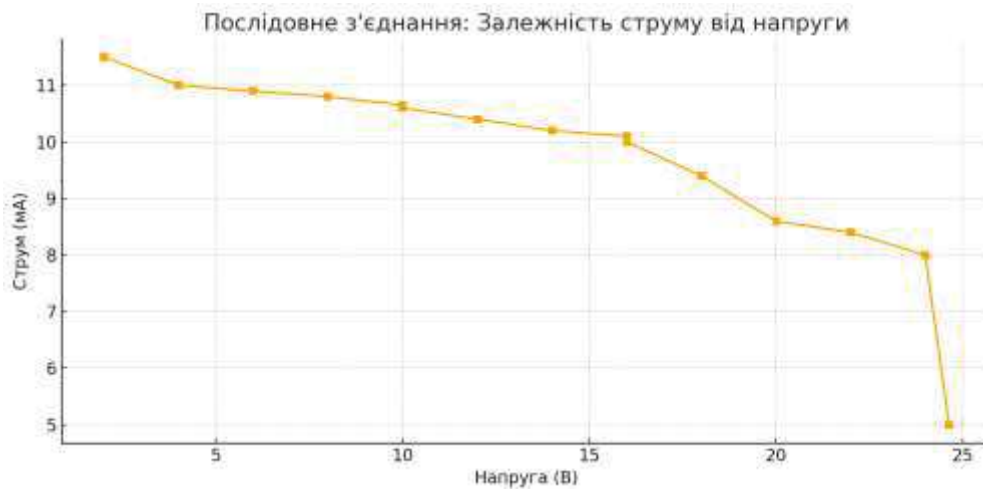


Рисунок 3.6 - Вольт-амперна характеристика - залежність $I = f(U)$

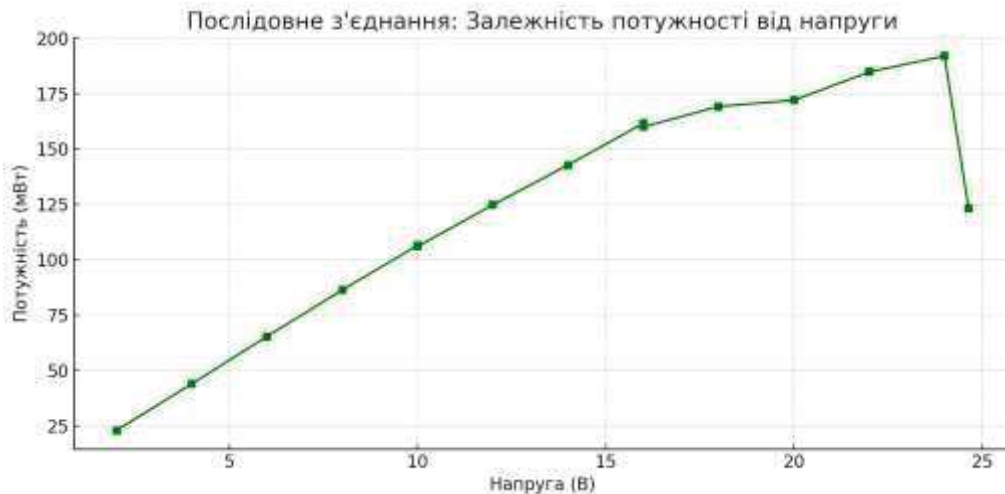


Рисунок 3.7 - Вольт-амперна характеристика (залежність $I = f(U)$)

26. З'єднуємо паралельно сонячні елементи FL2-FL4 в батарею і проводимо дослідження згідно з пунктами 3-13 і пунктами 18-20.

Таблиця 3.1 – Залежність вихідної потужності сонячної батареї від навантаження при паралельному з'єднанні елементів

№ досліджу	Навантаження R_n , Ом	Напруга U , В	Струм I , мА	Потужність P , мВт
1	990	6,16	20	123,2
2	940	6	32	192
3	620	5,5	33,6	184,8
4	380	5	34,4	172
5	250	4,5	37,6	169,2
6	200	4	40	160
7	170	4	40,4	161,6
8	150	3,5	40,8	142,8
9	140	3	41,6	124,8
10	130	2,5	42,4	106
11	100	2,5	42,6	106,5
12	80	2	43,2	86,4
13	60	1,5	43,6	65,4
14	40	1	44	44
15	20	0,5	46	23

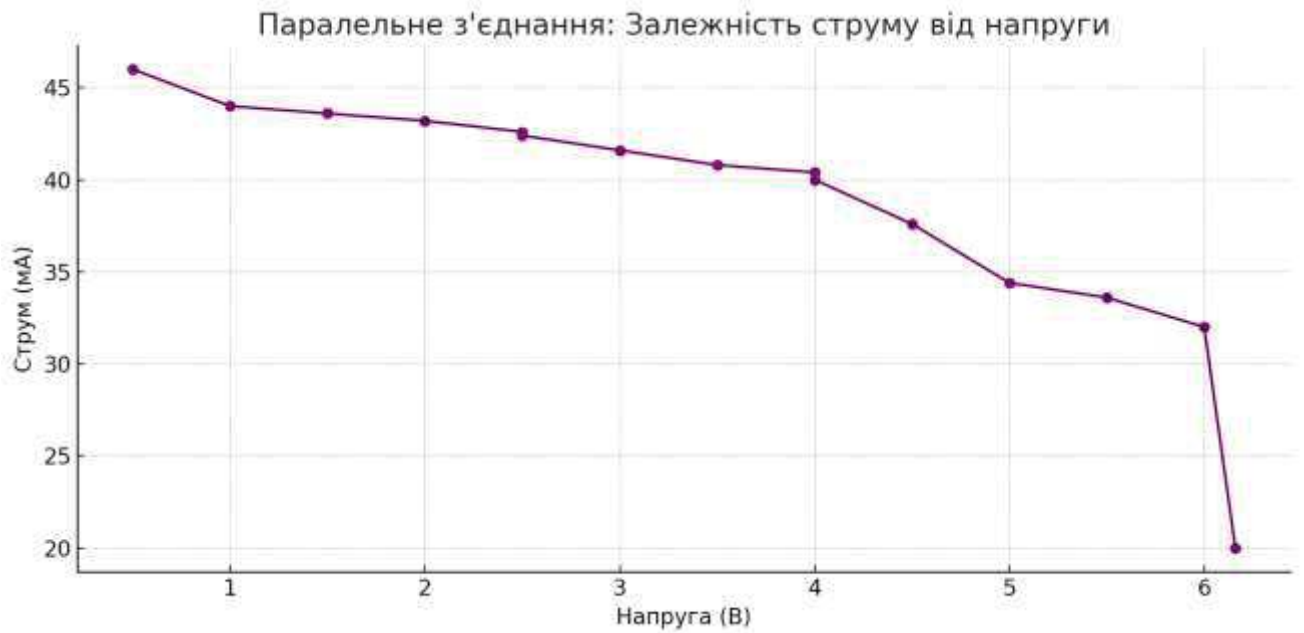


Рисунок 3.8 - Навантажувальну характеристики для сонячної батареї (залежність $P = f(U)$)

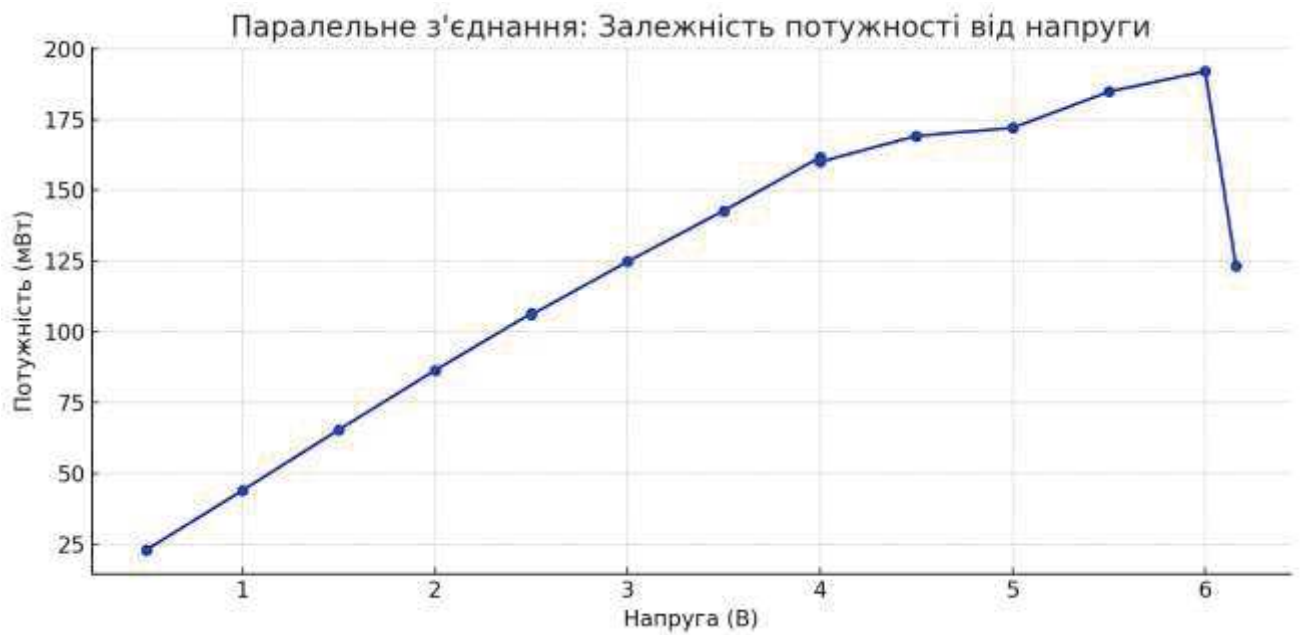


Рисунок 3.9 - Навантажувальну характеристики для сонячної батареї (залежність $P = f(U)$)

Висновки до розділу 3.

Було розроблено програму випробувань, що охоплює різні режими роботи фотоелементів при змінних умовах освітлення та навантаження. Описано вимірювальні прилади, які забезпечують точність отриманих результатів (мультиметри, освітлювачі, стабілізовані джерела живлення, термометри). Розроблено алгоритм обробки експериментальних даних, включно з побудовою графіків залежності струму, напруги та потужності від освітленості. Це дозволяє визначити основні параметри сонячного елемента, зокрема ККД, точку максимальної потужності та інші характеристичні величини.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У межах бакалаврської роботи було виконано повний цикл розробки лабораторного стенда для дослідження сонячних елементів, що включає теоретичне обґрунтування, технічне проектування та методику проведення експериментальних досліджень.

На основі аналізу літератури були вивчені принципи роботи фотоелементів, їх типи та конструкції, а також сучасні тенденції у сфері сонячної енергетики. Це дозволило сформулювати обґрунтовані вимоги до лабораторного обладнання.

У процесі розробки було здійснено вибір найбільш доцільного типу сонячного елемента для досліджень, створено електричну принципову схему стенда, а також запропоновано конструктивне рішення, яке забезпечує зручність експлуатації, наочність та безпеку при проведенні вимірювань.

Розроблена методика досліджень дозволяє проводити комплексну оцінку роботи фотоелементів при змінних умовах освітлення та навантаження, а також визначати ключові параметри їхньої ефективності. Запропонована система вимірювання та обробки результатів дає можливість точно визначати точку максимальної потужності, розраховувати ККД та оцінювати стабільність роботи сонячного елемента.

Отримані результати можуть бути використані в навчальному процесі для підготовки фахівців у галузі енергоефективних технологій, а також у подальших дослідженнях і вдосконаленні лабораторного обладнання для вивчення відновлюваних джерел енергії.

Додатки

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

