

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра відновлюваних джерел енергії

До захисту допущено
Завідувач кафедри

“ _____ С.О.Кудря
_____ ” _____ 2019р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття ступеня бакалавра

до дипломної роботи освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за напрямком
підготовки 6.050701 – "Електротехніка та електротехнології"
на тему: «Вимірювальна система для визначення характеристик фотомодулів в
польових умовах»

Студент групи	<u>ЕД-51</u>	_____	<u>Корнієнко Іван Олексійович</u>
	(шифр групи)	(підпис)	(ім'я, по-батькові, прізвище)
Керівник роботи		_____	<u>д-р. ф.-м. наук, проф. Гаєвський О.Ю.</u>
		(підпис)	(вчена ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)
Рецензент		_____	_____
		(підпис)	(вчена ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
До дипломної роботи
на тему: «Вимірювальна система для визначення характеристик
фотомодулів в польових умовах »

Київ – 2019

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра відновлюваних джерел енергії
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Кудря С. О.

«__» _____ 2019 р.

Завдання
на дипломну роботу студенту

Корнієнку Івану Олексійовичу

1. Тема роботи: «Вимірювальна система для визначення характеристик фотомодулів в польових умовах»

керівник роботи д-р. ф.-м. наук. проф. Гаєвський Олександр Юлійович

затверджені наказом по університету від «08» квітня 2019 р. № 1085-с

2. Строк подання студентом роботи «12» червня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи : технічні характеристики фотомодулів,
мікроконтролерної плати, датчиків сонячної радіації та освітленості.

4. Зміст пояснювальної записки

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Розділ 1 «Системи тестування фотомодулів»	14.02.19 – 26.02.19	
2	Розділ 2 «Будова і принцип роботи розробленого пристрою»	01.03.19 – 07.05.19	
3	Розділ 3 «Екстракція параметрів фотомодуля»	08.05.19 – 31.05.19	
4	Розділ 4 «Охорона праці»	01.06.19 – 04.06.19	
5	Загальні висновки	05.06.19 – 10.06.19	

Студент

Корнієнко І.О.

Керівник проекту

Гаєвський О.Ю.

Анотація

Метою дипломної роботи є розробка системи для визначення електричних характеристик фотоелектричних модулів в польових умовах, які розташовані на сонячних фотоелектричних станціях. Завдання дипломної роботи полягало у створенні вимірювального пристрою з програмним управлінням для зняття вольт-амперних характеристик фотомодулів та створенні теоретичних методів та відповідних програм обробки експериментальних даних та визначення основних параметрів електричної схеми заміщення фотомодуля. Ці задачі актуальні для тестування та діагностики поточного стану фотомодулів, визначення фактичних електричних параметрів фотомодулів, набір яких має бути більш повним, ніж той, що надається виробниками в технічних описах фотоелектричних панелей. Значення цих параметрів необхідні для коректного вирішення задач оптимізації при проектуванні фотоелектричних станцій, а також при їх експлуатації.

Для вимірювання вольт-амперних характеристик фотомодулів використовувався метод змінного опору навантаження. Цей метод реалізований над базі мікроконтролерної плати, яка здійснює комутацію електромагнітними реле, збір та передачу експериментальних даних на ПК через послідовний порт. Розрахунки параметрів фотомодулів виконуються за допомогою оригінального методу рішення системи нелінійних рівнянь за стійким ітераційним алгоритмом, розробленим в програмному середовищі пакету MATLAB 2018a.

У даній дипломній роботі реалізована система для визначення параметрів фотоелектричних модулів за допомогою розробленого програмного забезпечення та вимірювального пристрою.

Пояснювальна записка містить 64 сторінок машинописного тексту формату А4, 34 рисунків, 5 таблиць і 32 найменувань за переліком посилань, 5 додатків.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, вольт-амперна характеристика, сонячна енергетика, затінення, програмне забезпечення, вимірювальний прилад, фотоелектростанція, мікроконтролер.

Annotation

The purpose of the graduate work is to develop a system for determining the electrical characteristics of photovoltaic modules in field conditions, which are located at photovoltaic power plants. The task of the work was to create a measuring device with software for measuring the I-V characteristics of PV modules and to create theoretical methods and software for processing experimental data and to determine the basic parameters of the PV module equivalent electric circuit. These tasks are relevant for testing and diagnosing the current state of PV modules, determining the actual electrical parameters of PV modules, the set of which should be more complete than that provided by manufacturers in their technical information of photovoltaic panels. The values of these parameters are necessary for the correct solution of optimization problems in the design of photovoltaic stations, as well as in their operation.

To trace the I-V characteristics curve of PV modules, the method of variable load resistance was used. This method is implemented using the microcontroller, which switching electromagnetic relays, the collection and transmission of experimental data to the PC through the serial port. The calculations of the parameters of the PV modules are performed using the original method of solving the system of nonlinear equations by a stable iterative algorithm developed in the software environment of the MATLAB 2018a package.

In this graduate work the system for the parameters determination of photovoltaic modules with the assist of the developed software and the measuring device is realized.

The explanatory note contains 64 pages of A4 text, 34 figures, 5 tables and 32 references, 5 applications.

Keywords: photovoltaic module, volt-ampere characteristic, solar energy, shading, software, measuring device, photovoltaic power station, microcontroller.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ТЕСТУВАННЯ ФОТОМОДУЛІВ.....	12
1.1 Огляд існуючих методів тестування	12
1.1.1 Метод змінного резистору	13
1.1.2 Метод ємнісного навантаження	14
1.1.3 Метод електронного навантаження	15
1.1.4 Метод біполярного підсилювача	16
1.1.5 Метод 4х-квадрантного блока живлення.....	17
1.1.6 Метод DC-DC перетворювача	18
РОЗДІЛ 2. БУДОВА І ПРИНЦИП РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИБОРУ	19
2.1 Основні компоненти вимірювального приладу.....	19
2.1.1 Мікроконтролерна плата	20
2.1.2 Магазин резисторів.....	22
2.1.3 Аналогово-цифровий перетворювач	23
2.1.4 Електромагнітні реле	24
2.1.5 Датчики сонячної радіації.....	25
2.1.6 Датчик температури.....	26
2.2 Електрична схема.....	27
2.3 Програмне забезпечення.....	28
2.3.1 Інтерфейс програми.....	28
2.3.2 Структура роботи програми.....	28
РОЗДІЛ 3. ЕКСТРАКЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОМОДУЛЯ.....	34
3.1 Однодіодна схема заміщення фотоелектричної комірки	34

3.2	Отримання параметрів схеми заміщення з вольт-амперної характеристики	35
3.3	Отримання даних та їх попередня обробка.....	36
3.4	Визначення параметрів схеми заміщення фотомодуля.....	38
3.5	Результати вимірювань та обробки даних.....	39
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....		46
4.1	Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при роботі з електрообладнанням	46
4.2	Заходи забезпечення сприятливих (безпечних умов праці).....	51
4.2.1	Загальна характеристика електроустановок.....	51
4.2.2	Забезпечення безпечної експлуатації	52
ВИСНОВКИ		53
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....		55
ДОДАТОК А.....		58
ДОДАТОК Б.....		60
ДОДАТОК В.....		62
ДОДАТОК Г		63
ДОДАТОК Е		64

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

1. ФМ – фотоелектричний модуль
2. ФЕС – фотоелектрична станція
3. ФЕК – фотоелектрична комірка
4. ВАХ – вольт-амперна характеристика
5. КЗ – коротке замикання
6. ХХ – холостий хід
7. STC – standard testing conditions
8. MPP – maximum power point
9. ККД – коефіцієнт корисної дії
10. ПК – персональний комп'ютер
11. АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ВСТУП

Для ефективної роботи фотоелектричних станцій в складі енергосистеми необхідно мати можливість точно прогнозувати виробіток станції при певних реальних умовах експлуатації. Необхідність проведення тестування фотомодулів (ФМ) для отримання його параметрів, характеристик і втрат є важливою задачею. Існуючі системи тестування не дають можливості отримати всі необхідні дані, а їхня вартість досягає декількох тисяч доларів. Створення недорогого вимірювального приладу, що оснований на відкритій платформі Arduino і розроблення алгоритму для визначення параметрів ФМ є перспективною задачею в цій області.

Ефективність ФМ серйозно залежить не тільки від сонячної радіації, затінення об'єктами, але і від процесу старіння при експлуатації в реальних умовах. Результатом старіння фотоелектричних модулів під дією температурних коливань, високої вологості, інтенсивного опромінення стає погіршення їх електричних характеристик і, в першу чергу, зниження ККД [1]. Таким чином, система вимірювання параметрів ФМ в умовах експлуатації може надати цінну інформацію для оптимізації виробітку і резервування енергії в енергосистемі. Така вимірювальна система повинна включати в себе як апаратні засоби для автоматизованих вимірювань в польових умовах, так і алгоритми для інтерпретації і обробки результатів вимірювань та отримання параметрів фотоелектричного модуля.

Також варто відзначити, що виробники фотомодулів зазвичай приводять обмежений набір характеристик – це, як правило: напруга холостого ходу (V_{oc}), струм короткого замикання (I_{sc}) і напруга та струм в точці максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP) та максимальна потужність фотомодуля [2]. Ці та інші параметри ФМ зазвичай оцінюються виробниками в стандартних умовах випробувань (Standard Test Conditions, STC) [3]. Але для опису поточного стану ФМ, особливо, після їх тривалої експлуатації, необхідне знання більш повного набору параметрів. Ці параметри повинні характеризувати, перш за все, електричні втрати, падіння ККД фотомодулів в

процесі експлуатації, а також поведінку ФМ в польових умовах, що значно відрізняються від STC.

Існують різноманітні методи і апаратне забезпечення, призначені для отримання параметрів фотомодуля [4]. Вони полягають, як правило, у вимірюванні вольт-амперної характеристики (ВАХ) за допомогою керування струмом, який проходить через фотомодуль. Визначення параметрів ФМ відбувається при подальшій програмній обробці отриманих результатів вимірювання ВАХ. На цьому етапі виконується моделювання ВАХ за допомогою різноманітних класів функції: експоненціальній, таких як в формулі Шоклі [5], функції Ламберта [6,7], сплайнів [8] та інших. Найбільш розповсюдженими є моделі, основані на представленні фотомодуля за допомогою однодіодної або двохдіодної схеми заміщення, в яких ВАХ діодів описується формулою Шоклі.

Для знаходження параметрів ФМ необхідно вирішувати систему нелінійних рівнянь, як в задачі безпосереднього знаходження параметрів, так і в задачі підгонки параметрів під експериментальні дані шляхом нелінійної оптимізації. Як відомо, при вирішенні таких систем необхідно задання початкових (стартових) значень параметрів, від яких в вирішальній мірі залежить результат ітераційного процесу. Для п'яти- і семи параметричних моделей одно- і двохдіодної схеми заміщення відповідно, точний результат можна отримати, якщо вдало підібрані ці стартові значення. Досвід показує, що невеликі зміни стартових значень призводять до непередбачуваних результатів. Це особливо характерно для визначення (екстракції) параметрів на основі польових вимірювань ФМ. Отримання стартових параметрів в цих випадках представляє собою окрему задачу, успішне рішення якої в великій мірі залежить від навичок та досвіду оператора.

Ця дипломна робота присвячена розробці вимірювальної системи, яка включає в себе апаратне забезпечення для швидкого і точного вимірювання ВАХ, інтенсивності сонячної радіації та температури, а також програмного забезпечення, який включає в себе програму обробки експериментальних даних, апроксимації даних по модельній функції та алгоритм екстракції параметрів.

РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ТЕСТУВАННЯ ФОТОМОДУЛІВ

1.1 Огляд існуючих методів тестування

Основним засобом для діагностики роботи фотомодулів є аналіз кривої ВАХ (рис. 1.1). Існує велика кількість методів отримання ВАХ [9], основна задача яких – керування струмом для ФМ і одночасного вимірювання пар значень напруги і струму. Лише експериментальні дослідження дозволяють отримати вольт-амперну характеристику ФМ. Знання цієї характеристики дозволяє визначити точку максимуму потужності, проводити діагностику ФМ та визначати параметри схеми заміщення фотоелектричної комірки (ФЕК).

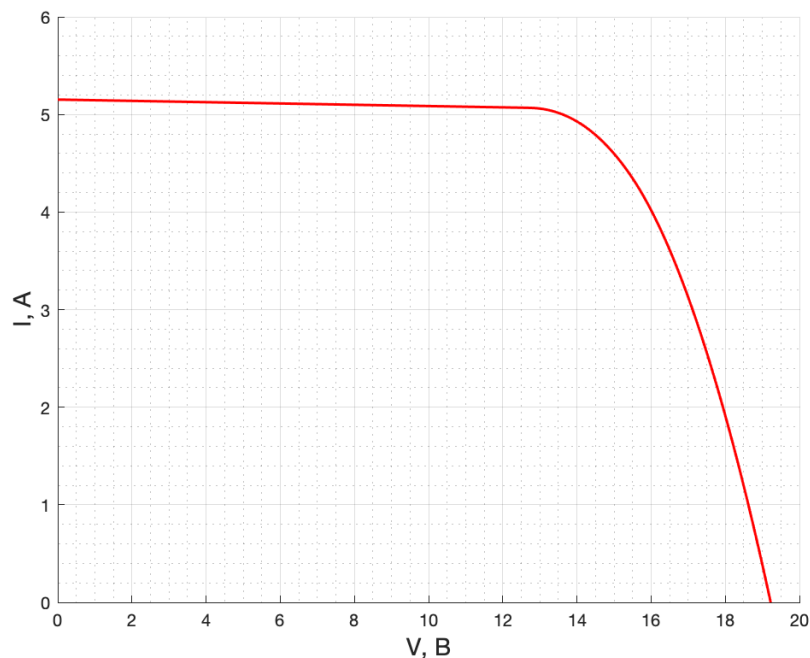


Рисунок 1.1 – Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля

Серед основних методів, які наразі застосовуються на практиці можна виділити:

1. Метод змінного резистору
2. Метод ємнісного навантаження
3. Метод електронного навантаження
4. Метод біполярного підсилювача
5. Метод 4х-квадрантного блока живлення
6. Метод DC-DC перетворювача

1.1.1 Метод змінного резистору

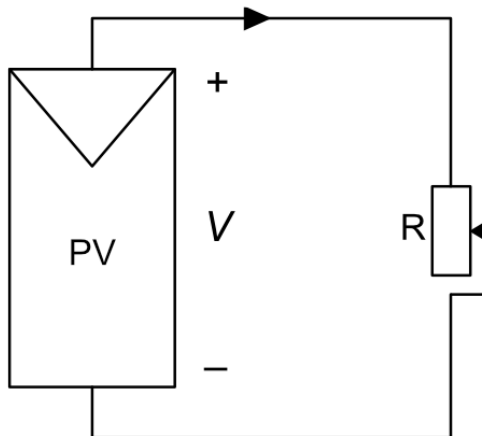


Рисунок 1.2 – Схема методу змінного резистору

Цей спосіб вимірювання ВАХ фотомодуля є найпростішим з усіх представлених. Принципова електрична схема зображена на рис. 1.2. Фотоелектричний модуль підключають до навантаження змінного опору, який змінюється від режиму короткого замикання до режиму холостого ходу. Разом зі зміною опору відбувається вимірювання значень напруги і струму. Енергія, яка виробляє фотоелектрична панель, розсіюється у вигляді тепла на цих резисторах, тому потужність, яку може виміряти така система досить обмежена.

Керування резистором можна здійснювати вручну, як це зроблено автором в роботі [10] і записуючи значення з двох мультиметрів, один з яких міряє напругу ФМ, а інший вимірює струм, або використовуючи масив реле і резисторів [11], які керуються з комп'ютера, і вимірювання напруги і струму через аналогово-цифровий перетворювач що дозволяє значно збільшити швидкість вимірювань. Швидкість отримання характеристики грає ключову роль в точності отриманих даних в польових умовах, коли умови не стійкі. Резистори обирають так, щоб якнайкраще охопити зону перегин ВАХ.

Недоліком даного методу є досить громіздка і важка конструкція, та фіксований набір резисторів, що часто призводить до нерівномірного покриття кривої ВАХ.

1.1.2 Метод ємнісного навантаження

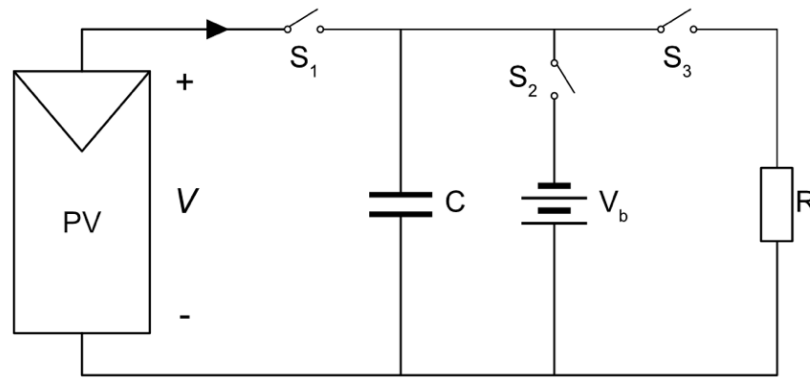


Рисунок 1.3 – Схема методу ємнісного навантаження

Метод ємнісного навантаження базується на підключенні до фотомодуля конденсатора великої ємності. Під час заряджання конденсатора, фотомодуль переходить від режиму короткого замикання до режиму холостого ходу. Електрична принципова схема зображена на рис. 1.3. На початку вимірювання конденсатор закорочений, і коли ключ S_3 відкривається, і ключ S_1 закривається, починається заряджання конденсатора. Коли заряд завершено, струм від фотомодуля стає дорівнювати 0, і досягається режим холостого ходу. Також, можна почати вимірювання з режиму холостого ходу, почавши з закритого ключа S_2 , який зарядить конденсатор до від'ємної напруги.

Для отримання надійних і стабільних кривих ВАХ, необхідно використовувати точно підібрані і високоякісні конденсатори (з низьким послідовним опором), але з'являється можливість вимірювати потужні фотоелектричні модулі, або масив з декількох фотомодулів. Також, неможливим є часткове відтворення певного режиму або частини кривої. Швидкість вимірювання кривої залежить від ємності конденсатора. Мінімальна необхідна ємність залежить від максимальної частоти зняття значень напруги та струму. Розробка подібного пристрою було описана автором в роботі [12]. Замість ключів S_1 , S_2 , S_3 можна використати електромагнітні реле або IGBT транзистори.

1.1.3 Метод електронного навантаження

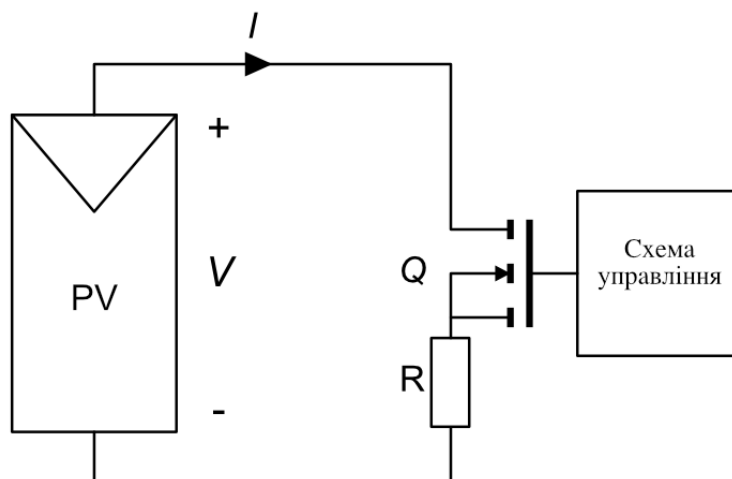


Рисунок 1.4 – Схема методу електронного навантаження

Метод електронного навантаження (рис. 1.4) використовує транзистор (зазвичай MOSFET) як навантаження фотомодуля. Опір між стоком і витокom змінюється через зміну напруги на затворі-витокu. При таких вимірюваннях, транзистор працює в лінійному режимі, що зменшує комутаційні характеристики. Через те, що вся потужність фотомодуля розсіюється на цих елементах, використання даного методу обмежується на фотомодулях середньої потужності. Перевагою цього методу є можливість швидко змінювати опір від короткого замикання до холостого ходу.

Для збільшення можливої потужності, MOSFET транзистори можна підключати паралельно і використовувати активне охолодження. В роботі [13] запропонована проста схема на основі MOSFET для швидкого отримання кривої ВАХ. Для запобігання перегрівання MOSFET транзисторів, необхідно швидко здійснювати процес виміру за допомогою аналогово-цифрових перетворювачів. Для точного керування ступенем відкриття транзистора, створюються схеми із використанням компаратора, оскільки характеристики транзистора можуть відрізнятися один від одного в каскаді транзисторів і змінюватися під впливом температури.

1.1.4 Метод біполярного підсилювача

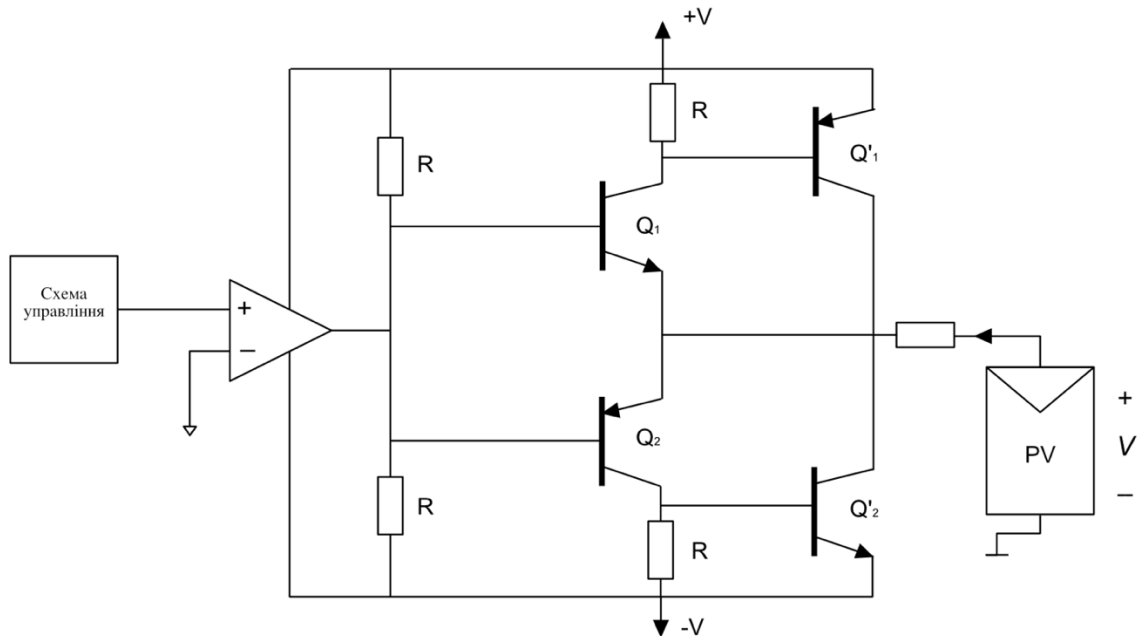


Рисунок 1.5 – Схема методу біполярного підсилювача

Цей спосіб передбачає просту схему, яка дозволяє перетворювати струм і напругу в модуль, і тому можна вимірювати темні криві I-V модуля. Його схема заснована на традиційному підсилювачі потужності класу B (рис. 1.5). Він використовує два транзистори BJTs як навантаження, для прямого і зворотного струму відповідно. Біполярні транзистори повинні працювати в трьох режимах роботи (відсічення, активний і насичений регіон). Як результат, більша частина потужності, що подається модулем, повинна бути розсіяна цими пристроями, що обмежує її застосування до середньої потужності.

У роботі [15] представлена вимірювальна установка, яка керується за допомогою ПК, яка орієнтована на вимірювання I-V характеристик великих площ сонячних батарей під штучним джерелом світла, який імітує сонячне випромінювання. Високий тестовий струм, необхідний для великої площі сонячного елемента, забезпечується біполярним підсилювачем потужності, що приводиться в дію генератором функцій, який виконує ступінчасту напругу на своєму виході.

1.1.5 Метод 4х-квадрантного блока живлення

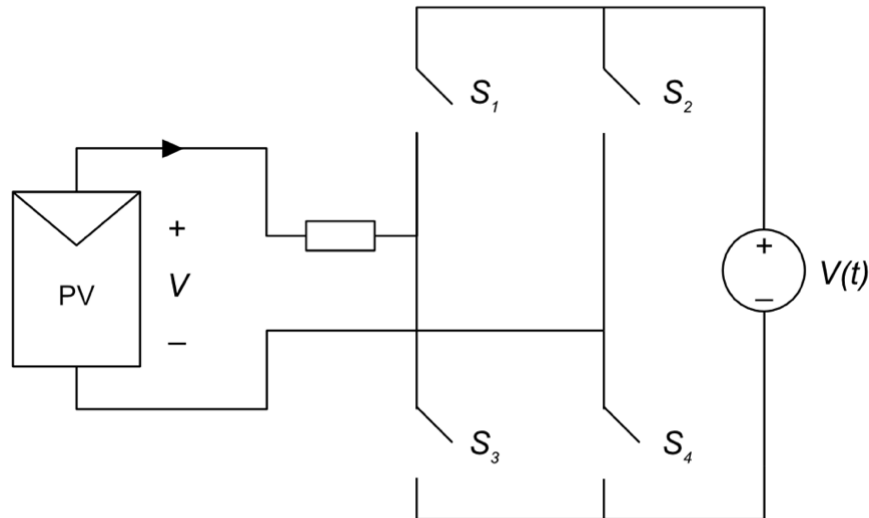


Рисунок 1.6 – Схема методу 4х-квадрантного блока живлення

4х-квадрантний блок живлення – це система, яка може постачати і розсіювати потужність, іншими словами, система може бути джерелом або споживачем струму з біполярною (позитивною або негативною) напругою. Для фотоелектричного модуля найбільший інтерес представляє отримання кривої ВАХ в першому квадранті. Але, дослідження характеристики в другому і четвертому квадранті є важливим інструментом діагностики роботи модуля.

Блок живлення з чотирма квадрантами може розглядатися як джерело живлення $V(t)$, вихід якого може змінюватися за допомогою опорного вхідного сигналу або запрограмований, для зміни діапазону значень. Схема, показана на рис. 1.6, являє собою функціональний вигляд чотирьох квадрантного джерела живлення. В роботі [10, 14] представлені розроблені пристрою, які використовують цей метод тестування фотомодулів.

Коли S_1 і S_4 закриті, а $V(t)$ вище, ніж напруга розімкнутого ланцюга фотоелектричного модуля, що досліджується, робоча точка PV зсувається в четвертий квадрант. Якщо S_1 і S_4 закриті, а $V(t)$ менше, ніж V_{oc} , то робоча точка PV зсувається в перший квадрант. Нарешті, якщо S_2 і S_3 закриті, напруга PV примушується до $-V(t)$, а робоча точка PV зміщується у другий квадрант.

1.1.6 Метод DC-DC перетворювача

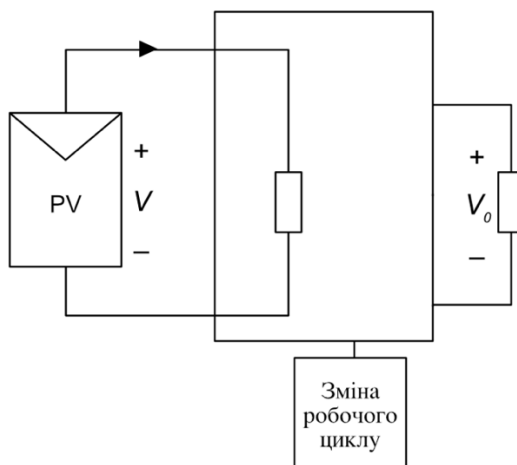


Рисунок 1.7 – Схема методу DC-DC перетворювача

Здатність DC-DC перетворювача симулювати резистор було вивчено і проаналізовано в декількох застосуваннях, одне з яких – отримання вольт-амперної характеристики фотомодуля. Три основні конфігурації конвертера (конвертер Buck, конвертер Boost та конвертер Buck-Boost) подібні до трансформатора постійного струму як в режимі безперервної провідності (CCM), так і в режимі розривної провідності (DCM). У трансформаторі постійного струму взаємозв'язок перетворення може управлятися електронним шляхом зміни робочого циклу перетворювача в діапазоні $[0,1]$. На рис. 1.7 показана схема, що характеризує модуль за допомогою DC-DC перетворювача з розгорткою робочого циклу.

Недоліком DC-DC перетворювачів є струмова пульсація індуктором через техніку перемикання (в інших методах цієї проблеми немає). Тим не менш, були розроблені деякі методи для зменшення пульсацій, які представлені в роботах [16,17]. Обидві роботи обговорюють використання таких методів для отримання кривої ВАХ сонячних модулів.

Навантаження із використанням DC-DC перетворювачів відрізняється простотою конструкції, низькою вартістю і високою швидкістю роботи. Навантаження може бути використано для тестування сонячної батареї і бути налаштоване для отримання ВАХ фотомодулів.

РОЗДІЛ 2. БУДОВА І ПРИНЦИП РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИСТРОЮ

2.1 Основні компоненти вимірювального приладу

В цій роботі була поставлена задача розробки приладу для вимірювання характеристик фотомодулів (перш за все ВАХ), який задовольняв би наступним вимогам:

1. Можливість проводити вимірювання фотомодулів потужністю до 150 Вт.
2. Висока швидкість проведення вимірювань (не більше декількох секунд).
3. Проста, компактна і надійна конструкція
4. Автоматизована робота
5. Невелика вартість виготовлення

З врахуванням вищезазначених вимог було спроектовано і створено вимірювальну систему. Основними апаратними засобами, які необхідні для зняття вольт-амперної характеристики фотоелектричного модуля є:

1. Мікроконтролерна плата Arduino Mega 2560;
2. Магазин резисторів;
3. 16 електромагнітних реле Songle SRD-05VDC-SL-C;
4. 2 зовнішніх аналогово-цифрових перетворювача Adafruit ADS1115;
5. Зовнішнє живлення на 5В;

Також, для отримання додаткових даних про освітленість, інтенсивність сонячної радіації і температури, які дозволяють отримати залежність ВАХ від цих величин, передбачено підключення наступних датчиків

1. Піранометр Kipp&Zonnen SP Lite Silicon EX Sense;
2. Двох цифрових датчиків освітленості GY-302 BH1750;
3. Цифровий датчик температури і вологості DHT-11.

На рис. 2.1 наведено кінцевий варіант розробленого пристрою. В наступних підрозділах буде описано кожен компонент окремо і обґрунтовано причину його вибору.

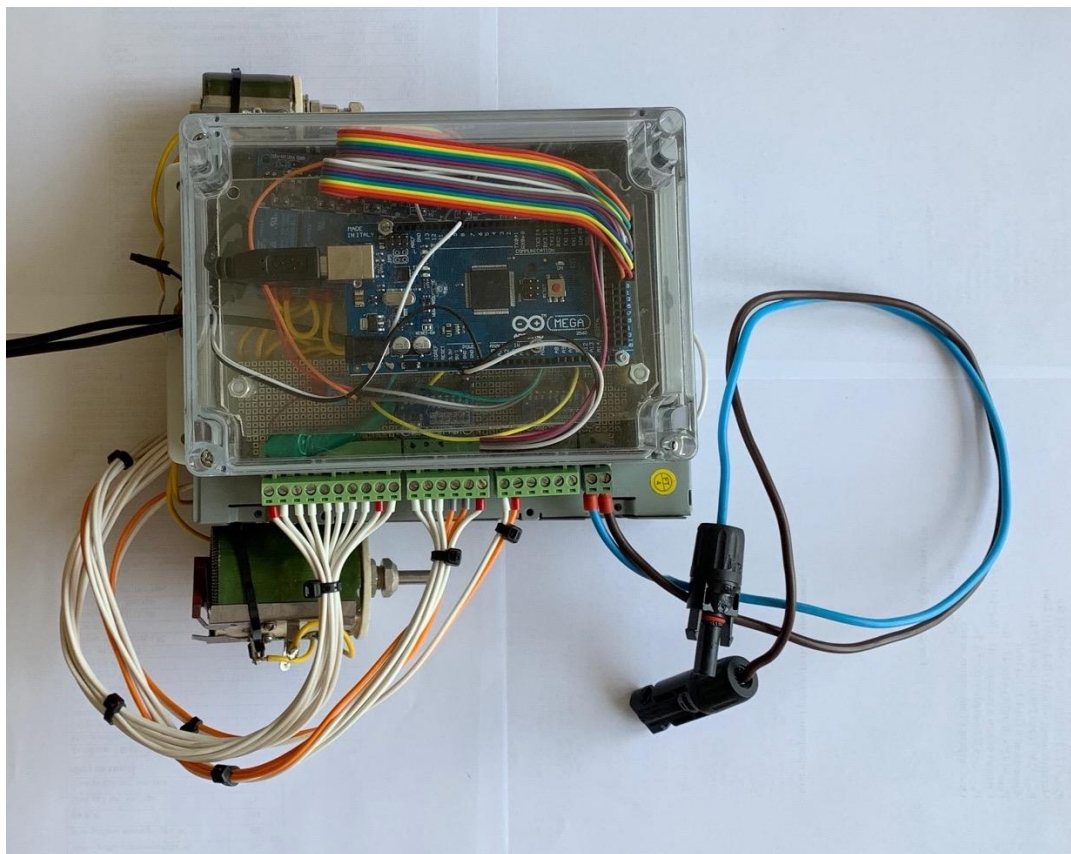
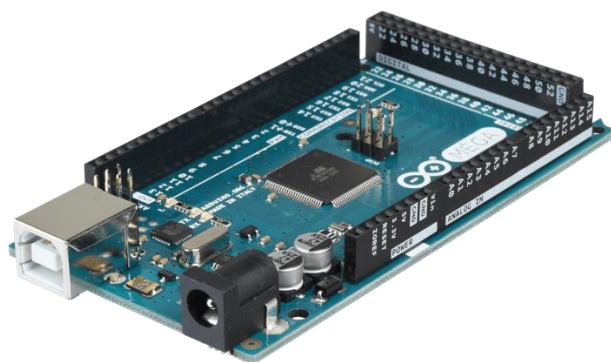


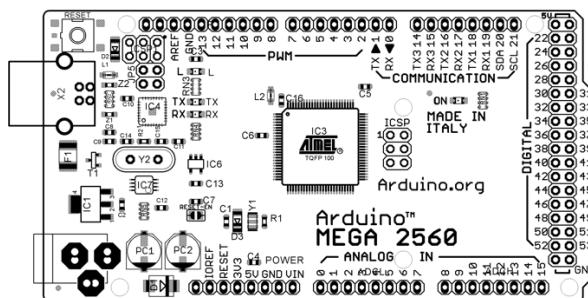
Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд розробленого вимірювального пристрою для отримання ВАХ

2.1.1 Мікроконтролерна плата

Швидка і автоматизована робота вимірювального пристрою забезпечуються мікроконтролером. Для цього було обрано мікроконтролер на відкритій платформі Arduino. Для керування 16-ти електромагнітних реле, також необхідність підключення декількох датчиків, необхідний мікроконтролер з достатньою кількістю підключень, тому було використано мікроконтролерну плату Arduino Mega 2560 із процесором ATmega2560.



а



б

Рисунок 2.2 – Arduino Mega 2560, а – загальний вигляд плати, б – позначення і розміщення підключень

Для підключення до комп'ютера в платі передбачено USB type B, в платі є 14 аналогових і 53 цифрових портів. В Arduino Mega 2560 є вбудований 8-бітний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), але його точності недостатньо для проведення точних і стабільних вимірів, так як результати вимірів сильно залежали від навантаження на систему живлення мікроконтролера. Завдяки дуже низькому енергоспоживанні є можливість створення автономної системи.

Серед інших можливостей плати є можливість підключення зовнішніх плат і інших Arduino через протокол I²C. Протокол I²C дозволяє одночасно по двом провідникам підключити до 128-ми пристроїв, які цей протокол підтримують. Але серед обмежень I²C можна виділити неможливість одночасного процесу передачі даних – на час передачі даних одним пристроєм займається вся лінія I²C. В цьому вимірювальному приладу ми під'єднали додатково два 16-бітних АЦП через цей протокол зв'язку для забезпечення більш точних і стабільних вимірювань значень напруги.

Керування мікроконтролером здійснюється за допомогою з комп'ютера через USB або Bluetooth підключення через встановлений MATLAB Arduino Support Package, який здійснює керування платою напряму, здійснює збереження і обробку отриманих даних і не потребує перенавантажування плати і перезапису нової програми. Обмеженням цього рішення є необхідність обов'язкового підключення комп'ютера для роботи мікроконтролера, оскільки програма виконується на комп'ютері.

Серед переваг цих мікроконтролерних плат можна виділити: найнижча ціна серед аналогів, велика кількість допоміжної літератури, відкрита програмна платформа, наявність в продажу широкого асортименту розширювальних плат і датчиків і низьке енергоспоживання.

Недоліком плати Arduino Mega 2560 є порівняно слабкий мікроконтролер Atmel з тактовою частотою 16 МГц, 256 кБ постійної пам'яті, низька точність вимірювань вбудованим АЦП.

2.1.2 Магазин резисторів

Для відтворення змінного навантаження для фотоелектричного модуля, було сконструйовані магазин резисторів, в якому присутні 16 опорів, які дають змогу змінювати опір навантаження від 1 Ом до 660 Ом, для режиму короткого замикання і холостого ходу відповідно.

Завдяки програмній реалізації і системі електромагнітних реле, які окремо керують кожним резистором, з'являється можливість отримати широкий спектр комбінацій для зміни опору всього магазину резисторів. При цьому наборі резисторів, є можливість утворити 1253 різних значень опору. Для оптимізації швидкості вимірювання і рівномірного охоплення кривої ВАХ в змінних умовах освітлення, програмне забезпечення обирає необхідний розподіл значень опору.

Номінальні значення опорів і типи резисторів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Опір і типи резисторів в магазині навантаження

№	Значення опору, Ом	Тип резистора
1	14,6	ПЕВР
2	0,15	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
3	0,3	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
4	0,6	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
5	0,6	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
6	0,6	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
7	0,6	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
8	0,6	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
9	0,6	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
10	0,6	Ніхромова проволока, 1.4 мм ²
11	1,8	Ніхромова проволока, 0.7 мм ²
12	2,1	Ніхромова проволока, 0.7 мм ²
13	2,1	Ніхромова проволока, 0.7 мм ²
14	7,6	ПЕВ
15	21,1	ПЕВ
16	596	ПЕВ

2.1.3 Аналогово-цифровий перетворювач

Підключення зовнішнього 4-х каналного 16-бітного АЦП ADS1115 компанії Adafruit до мікроконтролера відбувається через шину I²C. Використання зовнішнього АЦП замість вбудованого АЦП дає можливість значно підняти роздільну здатність і точність вимірювань. Наявність 4-х каналів вимірювання напруги дає можливість підключити додаткові датчики для вимірювання температури і освітленості навколишнього середовища безпосередньо під час вимірювань.

Використання двох АЦП ADS1115 пов'язана з особливістю його роботи – він здійснює вимірювання і передачу даних лише по одному з 4х каналів згідно записаній конфігурації. Для вимірювання з іншого каналу необхідно змінити конфігурацію, цей процес займає лінію I²C і збільшує час вимірювань. Тому для паралельно вимірювання значення напруги і струму використовуються два АЦП.

В режимі без підсилення вхідної напруги максимальна дискретність вимірів складає 0,125 мВ, а при вимірюванні малих значень напруги (наприклад, на струмовому шунті або значення з піранометра), є можливість підсилити вхідний сигнал до 16 разів, що збільшує дискретність вимірів до 0,0078125 мВ. АЦП ADS1115 має максимальні частоту обробки вхідних даних 860 Гц.

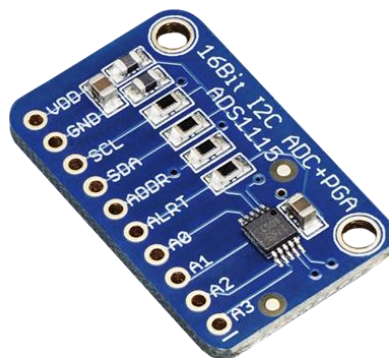


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд АЦП Adafruit ADS1115

Значним недоліком цього АЦП є обмежені границі вимірювань, тому для вимірювання напруги фотомодуля, АЦП вимірює напругу з дільника напруги, а струм вимірюється через падіння напруги на струмовому шунті.

2.1.4 Електромагнітні реле

Управління опорами здійснюється системою з 16-ти реле марки Songle SRD-05VDC-SL-C, які мають максимальний струм комутації 10А і комутації постійної напруги 35В та живлення реле 5В. Слід вказати, що під час проектування установки були розглянуті у якості комутаторів резисторів транзистори типу MOSFET. Але у подальшому перевагу було надано електронним реле через більш просту роботу і підключення. Під час дослідів було виміряно, що значення опору реле в замкненому стані становить близько 0,05 Ом. Струм споживання одного реле складає 70 мА, а при включені всіх 16-ти реле сумарний струм споживання досягає 900 мА. Реле в системі зібрані в окремі плати по 8 реле з опторозв'язкою, щоб запобігти пошкодженню мікроконтролера.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд реле Songle SRD-05VDC-SL-C

Для правильної і надійної роботи електромагнітних реле необхідне забезпечити стабільне живлення обмоток реле напругою 5В. В процесі розробки приладу було виявлено, що мікроконтролерна плата не може забезпечити стабільну напругу живлення для реле, і при включені 16-ти реле, напруга живлення Arduino просідала до 3,4 В і під час проведення вимірювань з сонячними панелями призводили до неповного прилягання контактів, їх плавлення і повному виходу з ладу реле. Для нашої системи в якості зовнішнього живлення використовується акумулятор з ємністю 10500 мА · год і стабільною напругою 5В при споживанні до 2А.

2.1.5 Датчики сонячної радіації

Окрім вищезазначених компонентів, в системі передбачено використання наступних датчиків:

1. Піранометр

В роботі для точних вимірювань інтенсивності сонячної радіації було використано піранометр Kipp&Zonnen SP Lite [25]. Для реєстрації фактичної інтенсивності сонячної радіації та її змін під час вимірювань, з метою вирівнювання коливань експериментальних даних через зміну освітлення, в системі є можливість підключення зовнішнього піранометра до високоточного АЦП ADS1115. Піранометр підходить для вимірювання сонячного випромінювання в діапазонах спектру від 400 до 1100 нм до максимум 2000 Вт/м² з часом відгуку менше 1 секунди і типовою чутливістю від 60 до 100 мкВ/Вт/м², яка змінюється менше 0,15%/°C (в межах від -30 до + 70 °C). SP-Lite оснащений екранованим кабелем довжиною 5 м з додатковим дротом для заземлення корпусу для прямого підключення до аналогово-цифрового перетворювача.



Рисунок 2.5 – Піранометр Kipp&Zonnen SP-Lite Silicon EX Sense

2. Цифровий датчик освітленості GY-302 BH1750

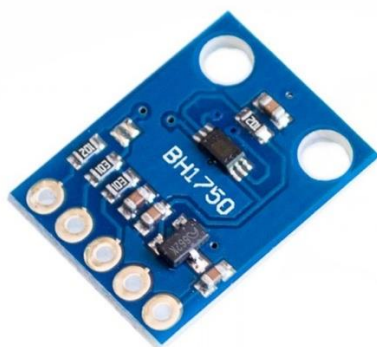
Цифровий датчик освітленості GY-302 на мікроконтролері BH1750 призначений для вимірювання навколишнього освітлення (рис. 2.6, а) [27]. Підключення цього датчику освітленості до вимірювальної системи відбувається по протоколу I²C. Межа вимірювань цього датчику складає від 0 до 65535 люкс, що недостатньо для проведення експериментів в реальних умовах під сонячним освітленням. Для вирішення даної проблеми було

використано оптичні фільтри, що встановлені перед датчиком, які рівномірно відносно спектру зменшують освітленість на ступінь, що залежить від параметрів обраного фільтру.

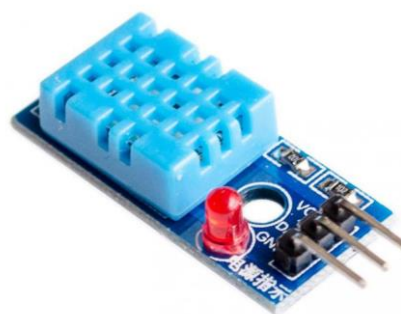
Використання датчиків BH1750 дозволяє реєструвати поточні значення сонячної радіації з високою швидкістю реагування на зміну освітлення, що надходить на експериментальний ФМ, для подальшої програмної обробки, знаходження залежності виробітку ФМ від значень освітленості тощо.

2.1.6 Датчик температури

Для вимірювання температури був використаний датчик DHT11, сумісний з платформою Arduino. Це цифровий датчик температури і вологості, складається з ємнісного датчика вологості і термістора (рис. 2.6, б) [26]. Підключення датчику і передача даних та управління відбувається за допомогою протоколу передачі даних I²C. Також, датчик містить в собі АЦП для перетворення аналогових значень вологості і температури. Вологість вимірює в межах 20-90% з точністю $\pm 5\%$, температуру в межах 0-50 °C з точністю $\pm 2\%$. Використання датчику температури DHT11 дозволяє реєструвати поточні значення температури ФМ та температури навколишнього середовища, для їх подальшої обробки, знаходження залежності виробітку ФМ від значень температури навколишнього середовища і нагріву фотоелектричної панелі тощо.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Датчик освітленості GY-302 BH1750 (а), датчик температури і вологості DHT-11 (б).

2.2 Електрична схема

На рис. 2.7 зображено електрична схема підключення компонентів системи. Управління реле здійснюється за допомогою цифрових виходів мікроконтролерної плати, а живлення постачається від зовнішнього акумулятора для забезпечення стабільної напруги. Кожному електромагнітному реле відповідає свій резистор. Значення напруги на фотомодулі визначається за допомогою формули (1):

$$U_{PV} = U_d \cdot \frac{R_{d1}}{R_{d1} + R_{d2} + R_{d3}}; \quad (1)$$

Для визначення струму вимірюється напруга на струмовому шунті (~0,25 Ом). Малий опір шунта дозволяє нам наблизитись до точки короткого замикання.

$$I_{load} = \frac{V_{A1}}{R_{shunt}}; \quad (2)$$

Перед тим, як почати складання кінцевого варіанта вимірювального пристрою, було створено електричну схему і перевірено її роботу в програмі National Instruments Multisim 14. Схема була розрахована, щоб витримувати струм 10А і підключати фотомодуль з напругою неробочого ходу 35В. Електрична схема, створена в цій програмі наведено в Додатку В. На рис. 2.7. наведено спрощене зображення основних компонентів електричної схеми.

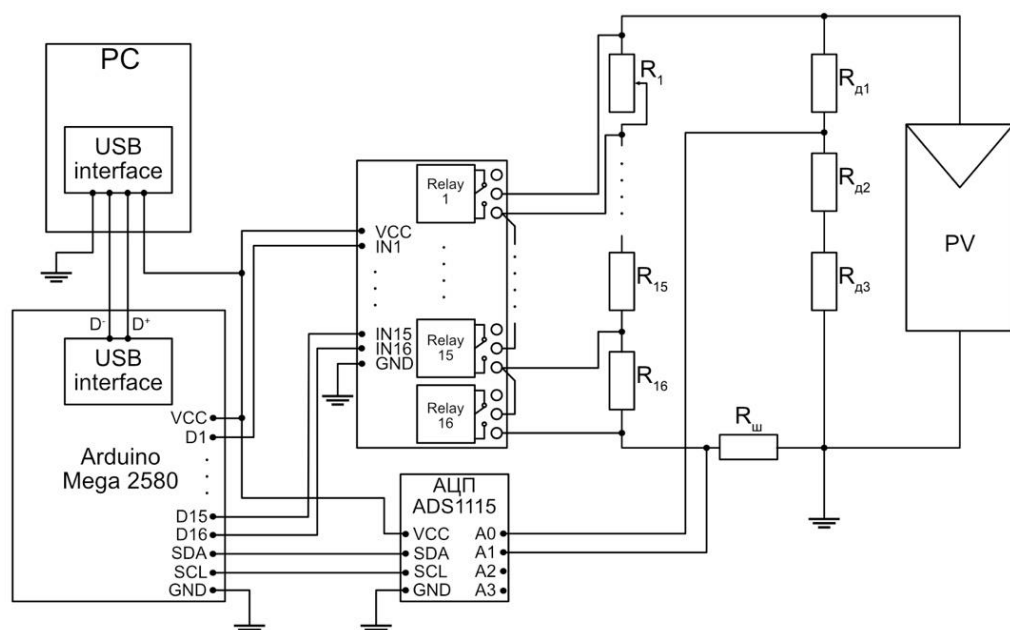


Рисунок 2.7 – Принципова електрична схема вимірювального пристрою

2.3 Програмне забезпечення

2.3.1 Інтерфейс програми

Завдяки відкритому коду і платформі Arduino, є можливість використати різні можливості для програмування мікроконтролера окрім основного Arduino IDE [29]. Так, в цій роботі використаний пакет підтримки Arduino [28], який встановлений в математичний пакет MatLab 2018a [30]. За допомогою вбудованого середовища розробки програм App Designer, було розроблений інтерфейс для керування підключенням до плати, конфігурування його роботи, проведення вимірювань, отримання і обробка даних. Також в програмі передбачені наступні функції:

1. Сервісний режим для вимірювального приладу (отримання Live – даних з усіх АЦП, ручне керування реле, сповільнений режим вимірювання).
2. Менеджер вимірів, який дозволяє переглядати всі виміряні дані, видаляти їх, зберігати, отримувати дані, та інше.
3. Підключення зовнішніх датчиків (освітлення і температури).

Програмування в середовищі MatLab дозволяє отримати доступ до широкої бібліотеки математичних функцій для проведення екстраполяції, дає можливість виконати апроксимацію за допомогою модельних кривих, провести розрахунки параметрів фотомодуля.

Також перевагою MatLab є наявність версій на всі популярні операційні системи, постійне надходження оновлень, а також наявність великої кількості навчальної і допоміжної літератури. В кінці розробки можна скомпілювати standalone-версію програми, яка не буде вимагати пакету MatLab, що встановлений на комп'ютері

2.3.2 Структура роботи програми

Висока автоматизація, простота роботи і швидкість проведення вимірювань забезпечується розробленою програмою. При запуску програми відбувається автоматичне підключення до плати Arduino, і далі очікується команда користувача.

При натисненні кнопки “Measure”, програма виконує велику послідовність команд, для забезпечення проведення вимірювання фотомодуля. Спочатку, програма підключає АЦП, і проводить його конфігурацію (задання частоти роботи, коефіцієнт підсилення, канал вимірювання). Конфігурування АЦП здійснюється через запис в 1-й регістр АЦП бінарної комбінації з 16 біт. Для зчитування значень напруги з АЦП необхідно зчитати значення з 0-го регістру. Детальні дані про налаштування АЦП без використання бібліотеки наведена в [32]. Таблиця конфігурування АЦП наведена в Додатку Е.

Далі, виконується функція, яка зчитує файл комбінацій і програма керує реле, обираючи необхідну комбінацію. Після кожного перемикання, відбувається вимірювання напруги на дільнику опорів першим АЦП і напруги на струмовому шунті другим АЦП. Кількість і порядок вимірювання задається в файлі комбінацій.

Після проведення вимірів і запису даних в масиви, програма проводить обробку даних: сортування по напрузі, перерахунок значень напруги дільника в напругу фотомодуля, і визначення струму фотомодуля. За наявності вимірювань інтенсивності сонячної радіації під час дослід, програма проводить перерахунок сили струму за формулою (8). Програма визначає струм короткого замикання, напругу холостого ходу і максимальну потужність. Далі, в інтерфейсі в панелі графіків будується ВАХ і крива потужності, дані вимірювання зберігаються в папці з усіма вимірами.

Далі, у користувача є можливість розрахувати параметри цієї ВАХ. Детальніше про процес екстракції параметрів йдеться в наступному розділі. Оскільки цей процес вимагає значних обчислювальних потужностей, екстракція параметрів не відбувається в автоматичному режимі.

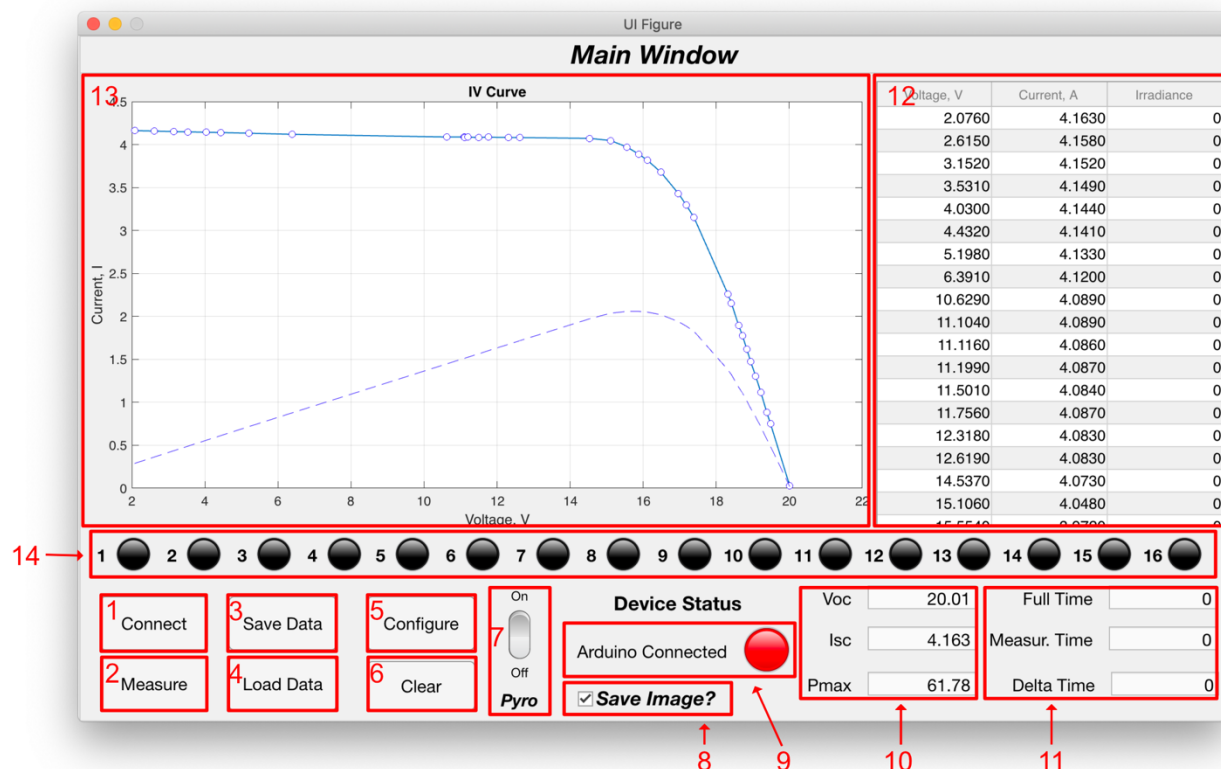


Рисунок 2.8 – Інтерфейс основного вікна програми

На рис. 2.8. зображене головне вікно програми, звідки відбувається проведення вимірювання, перегляд графіку, отримання і запис даних в таблицю, та відображаються основні параметри ФМ.

1. Кнопка Connect – здійснює перехід до вікна підключення (рис. Додаток Г.1) у випадку, якщо не вдалося автоматично обрати тип плати і підключитись до Serial Port.
2. Кнопка Measure – здійснює велику кількість операцій для процесу вимірювання, збереження даних у вигляді .txt файлу, побудову даних у вигляді графіку у вікні 13 та розрахунок основних параметрів.
3. Кнопка Save Data – зберігає отримані в останньому вимірі дані в окрему папку.
4. Кнопка Load Data – відкриває менеджер експериментальних даних, де можна переглянути всі проведені вимірювання, завантажити їх в основне вікно або видалити (рис. Додаток Г.2).
5. Кнопка Configure – здійснює перехід до панелі налаштувань (рис. 2.9):

- a. *ADS Test* — сервісна функція, дозволяє в режимі реального часу моніторити одночасно всі входи зовнішніх АЦП за допомогою виводу відповідних графіків;
 - b. *Set Type of PV testing* — дозволяє обирати тип вимірювань:
 - i. *Short Series Mode* — найшвидший режим, виміри за допомогою 16 відліків, загальний час вимірювання ВАХ менше 400 мс;
 - ii. *Combination mode* — точний режим, дозволяє проводити виміри за допомогою різних комбінацій,
 - c. *Set Time Delay* — дозволяє задати певну затримку між кожним відліком в межах одного вимірювання, в мс.;
 - d. *Use comparator* — дозволяє вказувати необхідність використання режиму компаратора зовнішніми АЦП, які вимірюють напругу і струм, що підвищує точність вимірювань;
 - e. *Generate* — виводить на графіку прогнозоване розміщення точок на модельній кривій ВАХ при заданих комбінаціях.
6. *Кнопка Clear* – видаляє останні виміряні дані і очищує вікно графіка.
 7. *Перемикач Pyro* – в увімкненому стані здійснює вимірювання напруги з каналу АЦП, до якого підключений піранометр, який був описаний в попередньому розділі. Дані про інтенсивність сонячної радіації зберігаються разом з експериментальними даними в .txt файлі.
 8. *Save Image* – в увімкненому стані зберігає графік останнього виміру у форматі tif для зручного перегляду отриманих даних на ПК.
 9. Цей індикатор має два положення:
 - a. Червоний – плата Arduino наразі не під'єднана, вимірювання відбуватися не будуть.
 - b. Зелений – плата підключення до комп'ютера, програма готова до проведення вимірювань.
 10. В цій області розміщено три поля, де відображаються основні параметри отриманої ВАХ: напруга холостого ходу U_{oc} , В, струм короткого замикання I_{sc} , А, максимум потужності P_m , Вт.

11. В цій області розміщено три поля, які показують інформацію про останній вимір, а саме: повний час роботи; час, за який відбулося зняття кривої ВАХ; середній час між відліками. Дані відображаються в секундах.
12. Область з таблицею, де заносяться результати останнього проведеного виміру. В перший стовпчик записується значення напруги, в другий – струму, в третій – значення інтенсивності сонячної радіації.
13. Поле, де будується графік з вольт-амперна характеристика $I(V)$ (суцільна синя лінія) і крива потужності $P(V)$ (пунктирна синя лінія), а також відмічаються експериментальні відліки. Масштаб обирається програмою автоматично.
14. Ряд з 16-ти індикаторів, які відображають в реальному часі поточний статус роботи кожного реле.

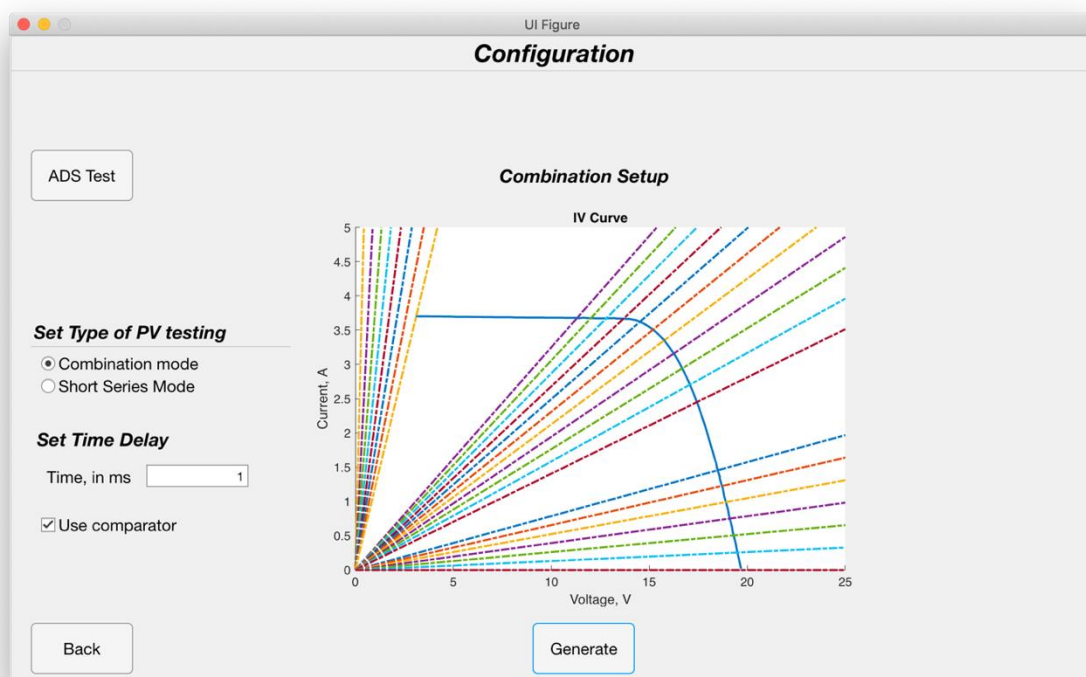


Рисунок 2.9 – Інтерфейс панелі "Configuration"

Програмний код для деяких функцій приведено в Додатку Б.

Для щільного і рівномірного покриття вольт-амперної характеристики необхідно для кожного вимірювання підбирати необхідну комбінації резисторів. Для цього було створено дві функції – Combination і Find. Перша відповідає за створення усіх можливих неповторювальних комбінацій при заданих резисторах в магазині опорів. Ця функція використовується лише один раз після

зміни номіналів резисторів, результат своєї роботи функція записує у txt-файл, який містить усі можливі комбінації у вигляді пар значень опір-комбінація.

Функція Find здійснює підбір необхідних комбінацій під кожне вимірювання. Він використовує файл, який надходить від функції Combination і за заданими параметрами дає на виході txt-файл, який містить в собі тільки ті комбінації включених реле, які будуть використані при наступному вимірюванні. Даний підхід дозволяє зменшити час проведення експерименту і розподілити належним чином експериментальні відліки на кривій ВАХ у наступних вимірюваннях.

РОЗДІЛ 3. ЕКСТРАКЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОМОДУЛЯ

3.1 Однодіодна схема заміщення фотоелектричної комірки

Кожну з фотоелектричних комірок можна представити в вигляді однодіодної схеми заміщення (рис. 3.1). Модельні параметри цієї схеми описують процеси генерації і розсіювання електричної потужності. Джерело струму моделює фотострум i_{ph} , послідовний опір r_s відповідає омичним втратам на контактах і в об'ємному шарі напівпровідників, паралельний (шунтуючий) опір r_p відповідає поверхневим струмам витоків [2-4]. Діод описує струм i_0 через pn – перехід, що знаходиться під прямим зміщенням при освітленні ФМ.

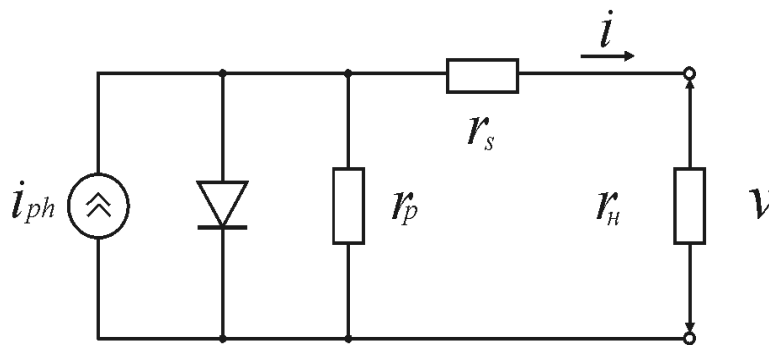


Рисунок 3.1 – Однодіодна схема заміщення фотоелектричної комірки

Більш точний опис ВАХ реальних фотоелектричних комірок дає двохдіодна схема заміщення [4] з сімома змінними параметрами, а також аналітичні підходи, що надають точне рішення нелінійних рівнянь для ВАХ [6, 7]. Слід зазначити, що комерційні програми, що моделюють роботу ФЕС в різних умовах (наприклад, PVSYST, TRNSYS, PSIM), обмежуються, як правило, однодіодною моделлю [20].

Фотоелектричний модуль складається з ФЕК, які включені послідовно в серії, а серії з'єднуються між собою паралельно. Паралельні серії збільшують струм, який генерує фотомодуль, а послідовне підключення збільшує напругу. Схематичне зображення фотоелектричного модуля з n_p – рядами і n_s – серіями показано на рис. 3.2.

Для зменшення впливу затінення ФЕК, в фотомодулях зазвичай передбачені обвідні діоди, оскільки затіненні комірки створюють додатковий опір фотомодуля.

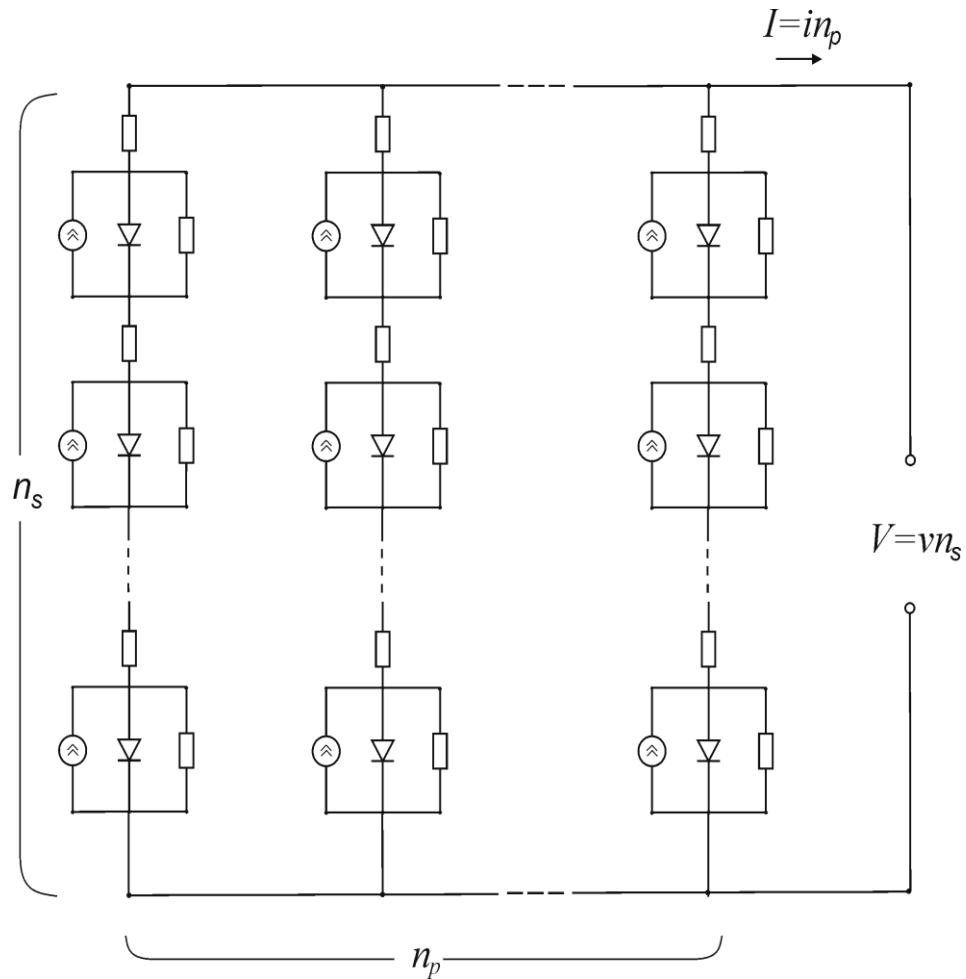


Рисунок 3.2 – Схема заміщення фотомодуля, яка складається з однодіодних схем заміщення ФЕК

3.2 Отримання параметрів схеми заміщення з вольт-амперної характеристики

Результуюча вольт-амперна характеристика описується рівнянням:

$$F(I, V) = I \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - I_{ph} + \frac{V}{R_p} + I_0 \left[\exp \left(\frac{\beta(V + I \cdot R_s)}{A \cdot n_s} \right) - 1 \right] = 0; \quad (3)$$

де $\beta = q/k \cdot T$, q – заряд електрона, k – постійна Больцмана, T – температура, $V = v \cdot n_s$ і $I = i \cdot n_p$ – напруга та струм в навантаженні; $I_{ph} = i_{ph} \cdot n_p$ – фотострум, $I_0 = i_0 \cdot n_p$ – зворотний струм насичення діода, A – коефіцієнт неідеальності діода, значення якого лежать в інтервалі від 1 до 2 [19]. За допомогою останнього ефективно описуються дифузна і рекомбінаційна компоненти струму: чим менше внесок рекомбінації в струм, тим ближче коефіцієнт A до 1. У формулі (3) введені еквівалентні послідовний $R_s = r_s \cdot n_s / n_p$ і паралельний $R_p = r_p \cdot n_s / n_p$ опори втрат.

Варто зазначити, що в моделі ФМ, який представлено вище, фотоелектричні комірки є ідентичним і знаходяться при однакових температурах і освітленості. Ця вимога важко здійснима для реальних фотомодулів ФЕС, особливо при неузгодженості параметрів і частковому затіненні ФМ.

3.3 Отримання даних та їх попередня обробка

Обробка результатів проводиться на основі кількох десятків експериментальних відліків (від 20 до 80 в залежності від умов вимірювань), які виміряні за максимально короткий час, який дозволяє ця вимірювальна система. В середньому, час між відліками складає близько 50 мс, цей час обумовлений особливістю роботи передачі даних від зовнішній аналогово-цифрових перетворювачів до мікроконтролера через $i2s$, де передача може відбуватися лише послідовно. За змінних умов освітлення і затінення необхідно зменшити кількість експериментальних відліків задля пришвидшення вимірювання всієї характеристики. В стабільних умовах можна отримати детальну характеристику завдяки великій кількості експериментальних даних.

Першим етапом попередньої обробки експериментальних даних є усунення повторювальних пар значень (I, V), їх сортування, видалення випадкових викидів. На основі оброблених даних створюється апроксимаційна крива, яка складається з 4х відрізків, які є поліномами 1-4 ої ступені з точками зшивання апроксимант, які показані на рис. 3.3.

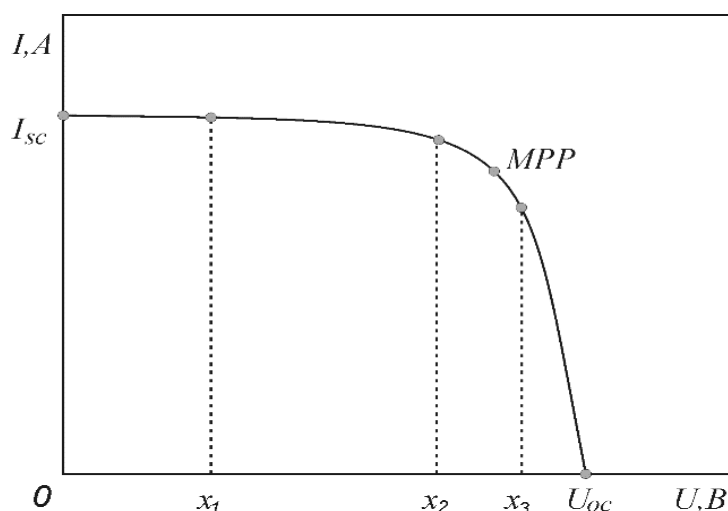


Рисунок 3.3 – Поділ ВАХ фотомодуля на відрізки апроксимації

Точка зшивання x_1 знаходиться правіше точки КЗ в кінці лінійної частини ВАХ. Точки x_2 і x_3 розташовуються лівіше і правіше точки МРР відповідно. Загальна формула для модельної функції має вигляд:

$$I(V) = \begin{cases} f_1(V) = a_0 + a_1 V, & V \leq x_1 \\ f_2(V) = f_1(x_1) + b_1(V - x_1) + b_2(V - x_1)^2 + b_3(V - x_1)^3, & x_1 \leq V \leq x_2 \\ f_3(V) = f_2(x_2) + c_1(V - x_2) + c_2(V - x_2)^2 + c_3(V - x_2)^3, & x_2 \leq V \leq x_3 \\ f_4(V) = f_3(x_3) + d_1(V - x_3) + d_2(V - x_3)^2 & V > x_3 \end{cases} \quad (4)$$

Функція (4) задовольняє умовам безперервності в точках зшивання апроксимант $f_i(V)$, а певні співвідношення між коефіцієнтами при ступенях поліномів забезпечують неперервність похідних. Реалізація програми апроксимації в пакеті MATLAB за схемою МНК дає визначення як коефіцієнтів розкладання, так і розташування точок зшивання.

За отриманими в результаті апроксимації коефіцієнтами апроксимант можна отримати динамічні провідності в області КЗ G_{sc} та ХХ G_{oc} .

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow 0} = a_1 = G_{sc} \equiv -\frac{1}{R_{sc}}, \quad (5)$$

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow V_{oc}} = d_1 + 2d_2(V_{oc} - x_3) = G_{oc} \equiv -\frac{1}{R_{oc}} \quad (6)$$

А також точку максимуму потужності (V_m, I_m), яка визначається рівнянням

$$I_m + V_m \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_m} = 0 \quad (7)$$

Для того, щоб зменшити вплив коливання освітлення, до вимірювального приладу передбачено підключення зовнішнього високоточного піранометра або датчика освітлення. Коригування експериментальних даних відбувається за допомогою формули (8):

$$I = I_{\text{експ}} \cdot \frac{\Phi_{\text{макс}}}{\Phi_{\text{експ}}} \quad (8)$$

3.4 Визначення параметрів схеми заміщення фотомодуля

Для знаходження набору параметрів $\Theta = \{I_{ph}, R_s, R_p, I_0, A\}$, які описують основні електричні властивості і поточний стан ФМ, необхідно здійснити екстракцію цих параметрів з отриманої ВАХ. Методика екстракції параметрів ФМ розроблена в роботі [21] і в цьому дипломному проекті базується на даних з одного набору експериментальних відліків (I, V) , яка заснована на однодіодній моделі ФЕК, що працює в статичному режимі, близькому до Standart Testing Conditions (STC), при активному навантаженні і прямому зміщенні рп-переходу. Перш ніж описати запропоновану процедуру екстракції параметрів нелінійної електричної моделі ФЕК, проведемо огляд можливих методів вирішення аналогічних завдань, відомих з літератури.

Перш за все, ці методи розрізняються обсягом експериментальних даних, що використовуються для обчислення параметрів. Мінімальна кількість вимірювань визначається числом характеристичних параметрів в наборі Θ . Згідно з аналітичними методами [4,5,6,7] параметри обчислюються за формулами, виходячи з виміряних значень напруги ХХ, струму КЗ, напруги і струму в точці максимуму потужності, а також нахилу дотичної до кривої $I(V)$ в точках КЗ і ХХ.

Для знаходження набору Θ з п'яти параметрів в даній роботі використана система рівнянь, в яку входять рівняння типу (3), записані для точок КЗ ($V = 0$, $I = I_{sc}$), ХХ ($V = V_{oc}$, $I = 0$) і в точці максимальної потужності ($V = V_m$, $I = I_m$) [21]:

$$I_{ph} - I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) - \frac{An_s}{\beta} Q_{sc} = 0, Q_{sc} = \frac{\beta I_0}{An_s} \exp\left(\frac{\beta I_{sc} R_s}{An_s}\right) \quad (9)$$

$$I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_p} - \frac{An_s}{\beta} Q_{oc} = 0, Q_{oc} = \frac{\beta I_0}{An_s} \exp\left(\frac{\beta V_{oc}}{An_s}\right) \quad (10)$$

$$I_{ph} - I_m \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) - \frac{V_m}{R_p} - \frac{An_s}{\beta} Q_m = 0, Q_m = I_0 \exp\left(\frac{\beta (V_m + I_m R_s)}{An_s}\right) \quad (11)$$

Ці рівняння доповнені також рівняннями для нахилів кривої ВАХ поблизу КЗ, ХХ:

$$\frac{(R_p + R_s - R_{sc})}{R_{sc} - R_s} - R_p Q_{sc} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{(R_p + R_s - R_{oc})}{R_{oc} - R_s} - R_p Q_{oc} = 0 \quad (13)$$

З нахилом кривої ВАХ поблизу точок холостого ходу і короткого замикання, що визначаються величинами R_{oc} та R_{sc} , пов'язані, в першу чергу, оцінки опорів втрат R_s та R_p .

3.5 Результати вимірювань та обробки даних

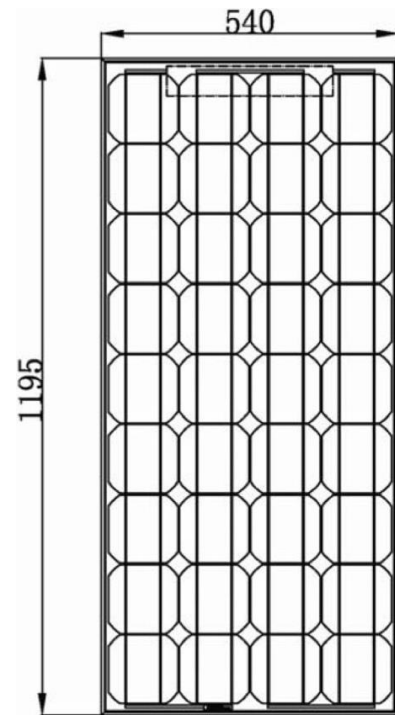
Вимірювання проводилися на даху 20-го корпусу на основі встановленого там монокристалічного фотоелектричного модуля компанії SunRise SR-M536100 потужністю 100 Вт. Паспортні технічні дані наведені в табл. 3.1. Зовнішній вигляд і габаритні розміри показані на рис. 3.4 [23].

Таблиця 3.1 – Характеристики сонячної панелі SR M536100

Параметри	Значення
Тип кремнію	монокристалічний
Струм короткого замикання I_{sc} , А	6,06
Струм максимуму потужності I_m , А	5,62
Напруга холостого ходу U_{oc} , В	22,10
Напруга максимуму потужності U_m , В	17,80
Максимальна потужність P_m , Вт	100
Вага, кг	7,7
Довжина, мм	1195,0
Ширина, мм	540,0
Висота, мм	35



а



б

Рисунок 3.4 – Фотомодуль SunRise SR-M536100: а – зовнішній вигляд; б – габарити і розміщення ФЕК.

Фотомодуль встановлено в портретній орієнтації на металевому каркасі на даху 20-го корпусу ФЕА НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», де і проводились експерименти. Даний ФМ орієнтований на південь з кутом нахилу $\beta = 35^\circ$. Основні виміри, які застосовані в даній роботі, були проведені 3го червня 2019 року при ясній погоді і відсутньому вітру.

Програма дає змогу побудувати модельну криву на основі експериментальних даних. Завдяки розробленому алгоритму, програма проводить однозначний розрахунок без необхідності задання початкових стартових точок (вони визначаються автоматично). При побудові суміщених графіків ВАХ експериментальні дані були заздалегідь приведені до одного значення інтенсивності сонячної радіації.

За допомогою програми були визначені точки максимуму потужності, струм короткого замикання, напруга холостого ходу. Вольт-амперна характеристика наведена на рис. 3.5.

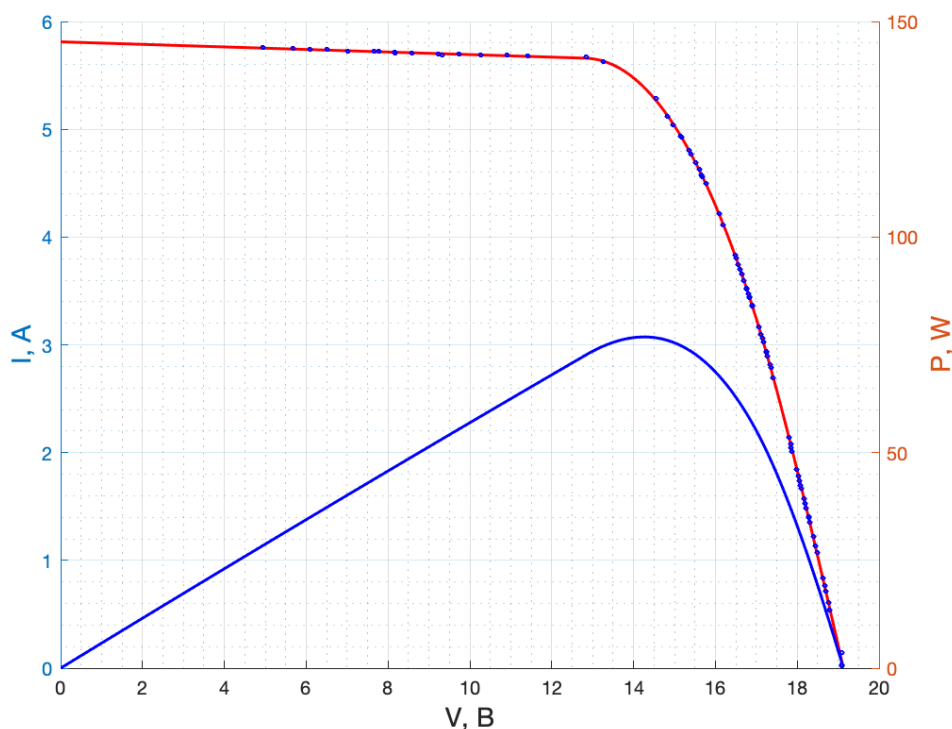


Рисунок 3.5 – Вольт-амперна характеристика фотомодуля SunRise при інтенсивності сонячної радіації 1059 Вт/м².

Максимум потужності (P_m) складає 76,82 Вт при напрузі (V_m) 14,5 В і струму (I_m) 5,81 А. Струм короткого замикання (I_{sc}) дорівнює 5,9 А, а напруга холостого ходу (V_{oc}) 19,01 В. Середньоквадратичне відхилення апроксимаційної кривої від експериментальних даних складає 0,49%. За допомогою алгоритму [21] можна провести екстракцію параметрів однодіодної схеми заміщення ФЕК.

Також були проведені виміри при різних ступенях затінення в портерній і альбомній орієнтації для дослідження залежності впливу затінення на ВАХ. Схеми розміщення затінення показані на рис. 3.6. Затінення фотомодулів здійснювалося за допомогою тканини агроволокна, згорнутого у два шари. Інтенсивність такої тіні складає 34%.

Ступінь затінення фотомодуля можна визначити за формулою (14).

$$s = \frac{S_{shade}}{S_{module}} \quad (14)$$

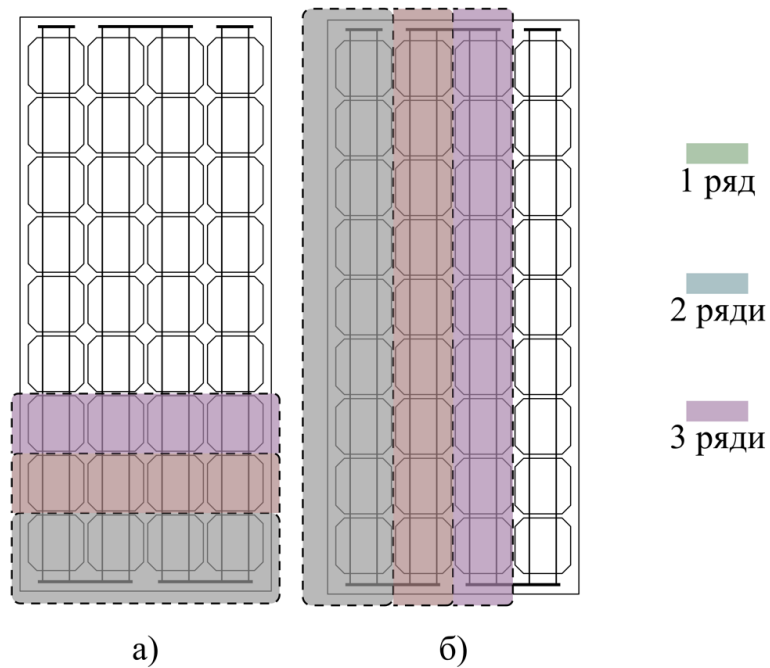


Рисунок 3.6 – Схема затінення фотомодуля

При портретній орієнтації затінення відбувається значне зменшення виробітку електроенергії фотоелектричною панеллю. Криві вольт-амперної характеристики при різних ступенях затінення наведені на рис. 3.7.

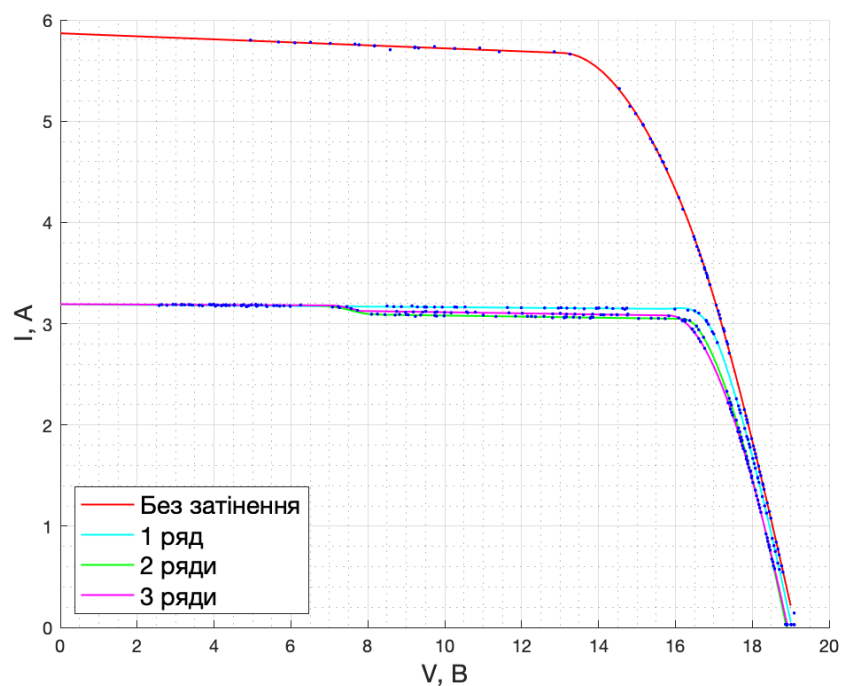


Рисунок 3.7 – Вольт-амперна характеристика монокристалічного модуля при різних ступенях затінення в портретній орієнтації при інтенсивності сонячної радіації 1062.3 Вт/м^2 .

ВАХ альбомного затінення і графік потужності приведені на рис. 3.8 і рис. 3.9 відповідно. При альбомній завдяки by-pass-діоду утворюється двоступенева вольт-амперна характеристика з двома точками максимуму.

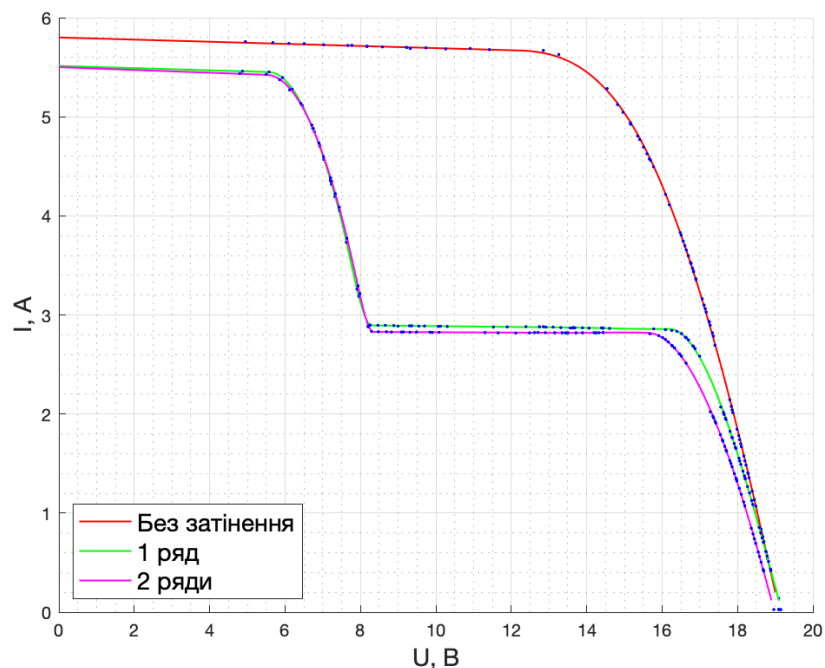


Рисунок 3.8 – Вольт-амперна характеристика монокристалічного модуля при різних ступенях затінення в альбомній орієнтації

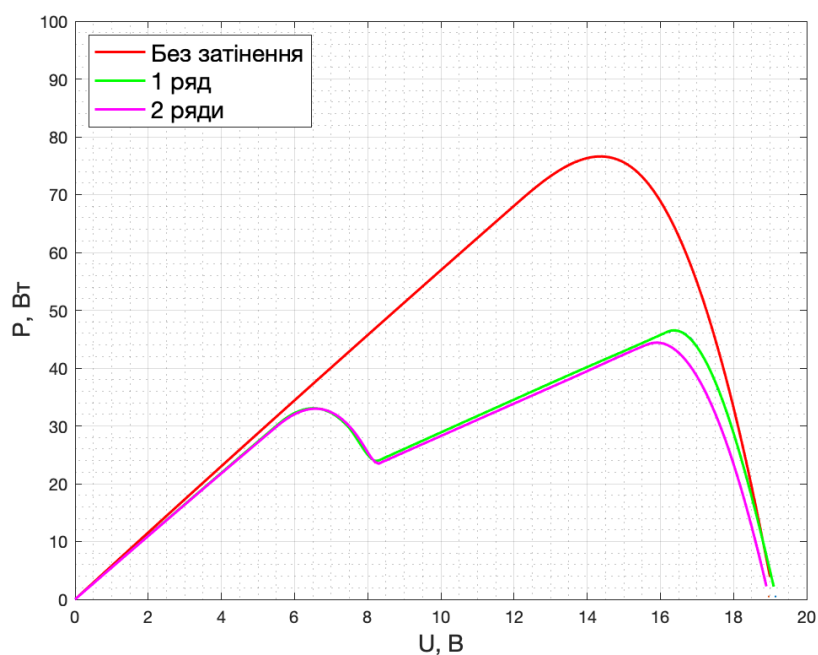


Рисунок 3.9 – Графік потужності монокристалічного модуля при різних ступенях затінення при альбомній орієнтації

Для випробовування меж вимірювання розробленого приладу, були також проведені виміри потужних полікристалічних модулів Risen RMS60-6-280P потужністю 280 Вт. Паспортні характеристики наведені в табл. 3.2 [22].

Таблиця 3.2 – Характеристики сонячної панелі Risen RMS60-6-280P

Параметри	Значення
Тип кремнію	полікристалічний
Струм короткого замикання I_{sc} , А	9,40
Струм максимуму потужності I_m , А	8,90
Напруга холостого ходу U_{oc} , В	38,30
Напруга максимуму потужності U_m , В	31,50
Максимальна потужність P_m , Вт	280
Вага, кг	18
Довжина, мм	1650
Ширина, мм	992
Висота, мм	35

Результати вимірів, вольт-амперна характеристика (рис. 3.10). З отриманих значень отримано наступні параметри і характеристики:

Максимум потужності (P_m) складає 170,65 Вт при напрузі (U_m) 26,5 В і струму (I_m) 6,9 А. Середньоквадратичне відхилення апроксимаційної кривої від експериментальних даних складає 0,45%.

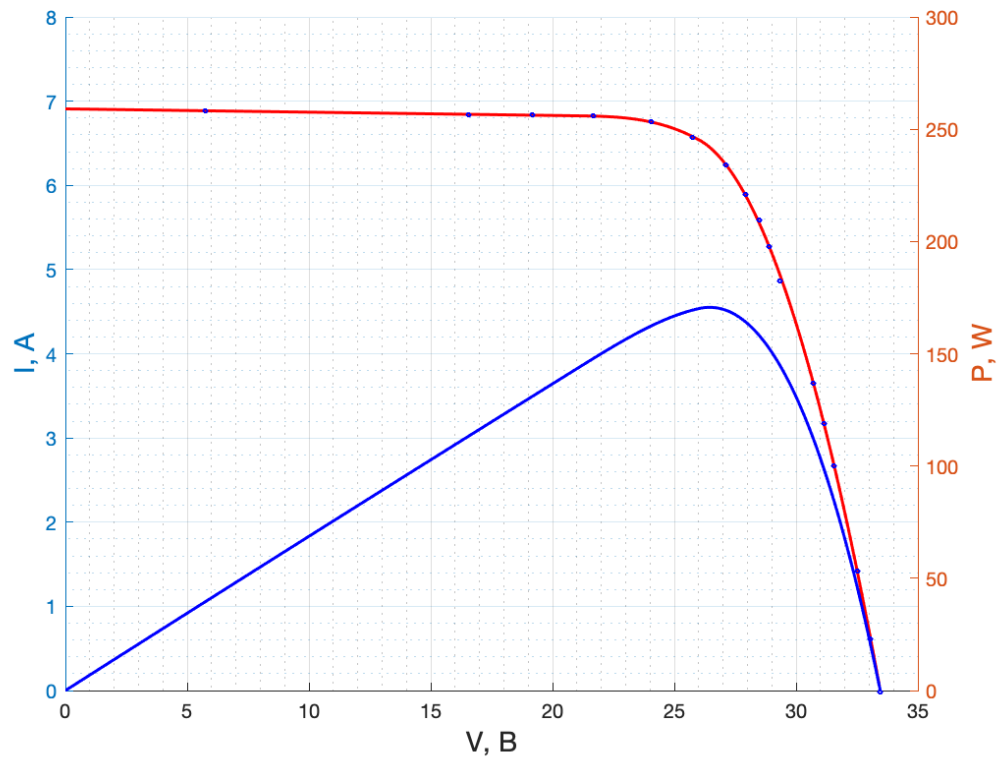


Рисунок 3.10 – Вольт-амперна характеристика (червона лінія) і крива потужності (синя лінія) полікристалічного модулю Risen RMS60-6-280P при інтенсивності сонячної радіації 760 Вт/м^2 .

В процесі дослідів з даним типом фотомодулів з потужністю вище 250 Вт було виявлено конструктивні обмеження, що не дозволяють проводити виміри фотомодулів такої потужності впродовж тривалого часу, і з часом, чисельні вимірювання таких потужних фотомодулів виводили пристрій з ладу, тому для цього вимірювального приладу було встановлено обмеження потужності 150 Вт, а також струм не повинен перевищувати 7А і напруга не більше 30В. Ці параметри не будуть шкодити внутрішнім компонентам пристрою.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при роботі з електрообладнанням

При роботі з електричним обладнанням необхідно дотримуватися правил безпеки. Додаткову небезпеку при роботі над цією дипломною роботою становила робота поза приміщенням в умовах підвищеної вологості, імовірності дощу і відсутності заземлення. Ці ризики часто призводять до електротравм.

Електротравма – травма, зумовлена дією на людину електричного струму, електричної дуги або електромагнітного поля.

Електротравматизм – це явище, яке характеризується сукупністю електротравм.

Електротравматизм порівняно з травматизмом від інших небезпечних чинників притаманні такі особливості:

- Можливість дистанційного отримання електротравм без безпосереднього контакту з установкою під напругою – це може бути ураження через електричну дугу, якщо людина наблизилася на критичну відстань до ЕУ напругою понад 1 кВ, або ураження напругою кроку, якщо людина знаходиться у зоні локальної землі у випадку замикання на землю в ЕУ.
- Можлива рефлекторність дії електричного струму – електричний струм, що протікає через тіло людини під час ураження, діє не тільки у місцях контактів, але ще спричиняє й рефлекторну дію, порушуючи роботу центрів, які координують роботу життєво важливих органів, найчастіше серцево-судинної системи та дихання.
- Невідомість більшості електротравм – розслідування та обліку доступні лише електротравми з важкими та смертельними наслідками, а усі інші випадки включення людини в електричне коло залишаються невідомими, хоча причини цих електротравм, як правило, однакові – такий стан негативно впливає на профілактику електротравм.

Протікання струму через тіло людини супроводжується термічним, електролітичним та біологічними ефектами.

Термічна дія струму полягає у нагріванні тканин і випаровуванні вологи, що викликає опіки, обвуглення тканин та їх розриви паровою.

Електролітична дія струму проявляється у розкладі органічної речовини (її електролізі), у тому числі і крові, що зумовлює зміну її фізико-хімічних і біохімічних властивостей.

Біологічна дія струму проявляється у порушенні біологічних процесів, що протікають в організмі, і супроводжується руйнуванням і збудженням тканин та скороченням м'язів.

За результатами (наслідками) дії електротравми поділяються на:

- місцеві (локальні) – відбуваються місцеві ураження тканин і органів, наслідок яких не загрожує життю людини;
- загальні (електроудари) – відбуваються ураження життєвоважливих систем і органів (дихання, серця та ін.), наслідок яких загрожує життю людини;
- змішані.

Місцеві електротравми. До місцевих електротравм відносяться: електричні опіки, електричні знаки, електрометалізація шкіри, електрофтальмія і механічні ушкодження.

Загальні електротравми (електричні удари) за наслідком поділяються на такі види:

- удари, що викликали судомні скорочення м'язів без втрати свідомості, системи дихання та серцево-судинна працюють нормально;
- удари, що викликали судомні скорочення м'язів з короткочасною втратою свідомості, але із працюючими системами дихання та серцево-судинною;

Передтермінова смерть – це смерть, яка настає через кілька годин або днів після дії електричного струму у результаті раптової зупинки серця, набряку легенів чи нирок.

Фактори електричного характеру. Головним небезпечним фактором у випадку електротравм вважається електричний струм, що протікає через людину. Від величини (сили) цього струму залежать наслідки ураження.

Виділяють такі порогові значення струму, тобто ті мінімальні значення, які викликають певні дії:

- пороговий відчутний струм – це мінімальне значення струму, який людина сприймає у вигляді ледь відчутних подразнень; її значення для змінного струму дорівнює $0,7 \dots 1,5$ мА, для постійного – $5 \dots 7$ мА;

- пороговий невідпускаючий струм – це мінімальна величина струму, яка викликає судомне скорочення м'язів, і людина не може самостійно звільнитися від струмовідних частин; її значення для змінного струму дорівнює $10 \dots 15$ мА, для постійного – $50 \dots 80$ мА;

- пороговий фібриляційний струм – це мінімальна величина струму, що викликає фібриляцію серця; її значення для змінного струму дорівнює 100 мА, для постійного – 300 мА.

Допустимі значення струму у випадку тривалої дії: для змінного струму промислової частоти – $0,6$ мА, для постійного – 1 мА.

Напруга на тілі людини впливає на тяжкість ураження. Допустима напруга на тілі людини у випадку тривалої дії складає для змінного струму 2 В, для постійного – 8 В.

Опір одягу залежить від товщини матеріалу та вологості; так, опір сухого одягу сягає $3 \dots 5$ кОм, вологого – до 1 кОм, а мокрого – $0 \dots 50$ Ом.

Опір взуття "включається" у коло людини, якщо струм проходить через людину і у землю. Високий опір має підощва з гуми, підощва з натуральної шкіри – до 20 кОм.

Опір опорної поверхні ніг – це опір підлоги чи ґрунту, на яких стоїть людина. Опір опорної поверхні ноги на дерев'яній підлозі сягає $3 \dots 5$ кОм

Опір тіла людини. Тіло людини – це складний комплекс тканин, електричні параметри яких розрізняються у широкому діапазоні. Найбільшу провідність має кров, м'язи, мозок; найменшу – шкіра, кістки, жирова тканина.

Прийнята еквівалентна схема електричного опору тіла людини (рис. 4.1, а) складається з активного і ємного опорів.

Ємність шкіри залежить від площі контакту і становить близько $0,02 \text{ мкФ/дм}^2$. Загальна ємність тіла людини становить – $C = 0,0425 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 42,5 \text{ пФ}$.

Опір шкіри залежить від її стану, щільності та площі контактів, прикладеної напруги, величини струму та тривалості протікання цього струму.

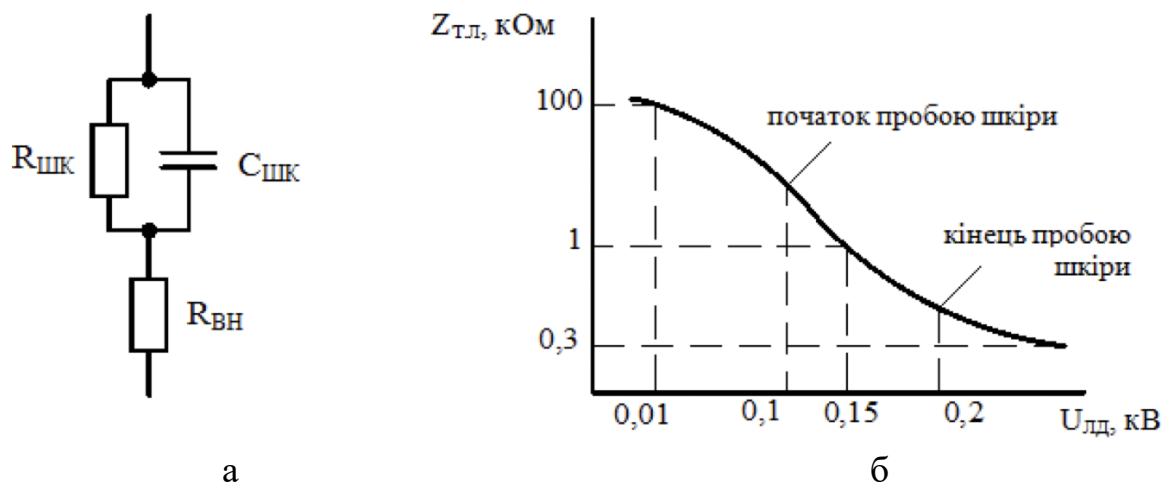


Рисунок 4.1 – Електричний опір тіла людини; а - еквівалентна електрична схема ($R_{шк}$ і $C_{шк}$ – активний опір і ємність шкіри відповідно; $R_{вн}$ – опір внутрішніх органів); б – залежність величини опору тіла людини від напруги, прикладеної до людини

Оскільки опір тіла людини електричному струму нелінійний і нестабільний та вести розрахунки з такими опорами достатньо складно, прийнято для попередніх розрахунків, що опір тіла людини електричному струму – величина постійна, лінійна, активна і становить 1000 Ом . Це відповідає більшості випадків включення людини у електричне коло за напруги $150 \dots 220 \text{ В}$.

Вид струму – постійний чи змінний. Вважається, що постійний струм, який проходить через тіло людини, порівняно зі змінним, викликає менш неприємні відчуття.

Фактори неелектричного характеру. Основними факторами неелектричного характеру є шлях струму через людину, тривалість протікання струму, індивідуальні особливості, стан організму людини і фактор уваги.

Шлях струму через тіло людини суттєво впливає на тяжкість ураження. Особливо небезпечно, коли струм проходить через життєво важливі органи і безпосередньо на них впливає. Серед випадків з тяжкими і смертельними наслідками частіше спостерігаються петлі “рука – рука” (40 %), “права рука ноги” (20 %), “ліва рука – ноги” (17 %).

Опір тіла залежить від шляху проходження струму:

- петля “рука – рука” – $R = 1360 \text{ Ом} / 220 \text{ В}, 1105 \text{ Ом} / 380 \text{ В};$
- петля “рука – нога” – $R = 970 \text{ Ом} / 220 \text{ В}; 650 \text{ Ом} / 380 \text{ В};$
- петля “руки – тіло – ноги” – $R = 670 \text{ Ом} / 220 \text{ В}; 504 \text{ Ом} / 380 \text{ В}.$

Тривалість дії електричного струму. Вплив цього чинника на тяжкість ураження обумовлений тим, що зі збільшенням тривалості протікання електричного струму зменшується опір тіла людини через зволоження шкіри і величина струму відповідно збільшується, а також виснажуються захисні сили організму, що протистоїть електричній енергії.

Залежність допустимих струмів, які можуть протікають через людину, і напруг дотику від тривалості дії наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Граничні значення струмів і напруг дотику від тривалості дії

Вид струму	Нормована величина	Гранично допустимі струми, мА, і напруги, В, у випадку включення у електричне коло, с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	Понад 1
Змінний: 50 Гц	I_d	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
	U_d												36
Постійний	I	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15
	U												0

Індивідуальні особливості і стан організму. Тяжкість ураження електричним струмом значною мірою залежить від стану організму. До більш тяжких уражень електричним струмом приводять: стан збурення нервової

системи, депресії; захворювання шкіри, серцево-судинної системи, органів внутрішньої секреції, легенів, різного характеру запалення, що супроводжуються підвищенням температури тіла, пітливість тощо. Більш тяжкі наслідки дії струму чітко спостерігаються у стані алкогольного чи наркотичного сп'яніння через послаблення організму.

Чинник уваги. Вплив цього чинника на тяжкість ураження обумовлюється тим, що у випадку несподіваного попадання людини під напругу захисні функції організму не налаштовані на небезпеку. Експериментально встановлено, якщо людина чітко усвідомлює загрозу можливості потрапити під напругу, то у разі виникнення такої загрози значення максимально припустимих струмів збільшуються (30...50) % .

Чинники довкілля. Вплив чинників виробничого середовища : вологість пил, аерозолі, конструктивне виконання підлоги, тобто чинників, які сприяють зменшенню опору тіла людини або утворюють замкнутий контур для протікання струму.

4.2 Заходи забезпечення сприятливих (безпечних умов праці)

4.2.1 Загальна характеристика електроустановок

Електробезпека – відсутність загрози з боку ЕУ життю, здоров'ю та майну людей, тваринам, рослинам та довкіллю.

Електроустановка (ЕУ) – це установка, в якій виробляється, перетворюється, передається, розподіляється та споживається (перетворюється у інші види) електрична енергія.

Глухозаземлена нейтраль – нейтраль генератора або трансформатора, приєднана до заземлювального пристрою (ЗП) безпосередньо або через малий опір (наприклад, трансформатор струму).

Ізольована нейтраль – нейтраль генератора або трансформатора, не приєднана до ЗП або приєднана до нього через великий опір приладів сигналізації, вимірювання та інших.

Компенсована нейтраль – нейтраль генератора або трансформатора, приєднана до ЗП через дугогасні реактори для компенсації ємнісного струму у мережі під час однофазних замикань на землю.

Заземлена через резистор нейтраль – нейтраль генератора або трансформатора в ЕМ з ізолюованою або компенсованою нейтраллю, приєднана до ЗП через резистор, наприклад, для захисту мережі від перенапруги або (і) виконання селективного захисту у разі замикання на землю, що призводить до збільшення струму замикання.

4.2.2 Забезпечення безпечної експлуатації

Безпечна експлуатація ЕУ забезпечується трьома методами:

- застосуванням стаціонарних конструктивних та схемних заходів захисту;
- використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), у тому числі електрозахисних;
- дотримання захисних організаційних заходів під час виконання робіт в ЕУ.

Конструктивні та схемні заходи захисту є невід'ємною частиною ЕУ. Згідно ПУЕ-2010 їх поділяють на дві групи:

- заходи захисту від прямого дотику у нормальному режимі роботи ЕУ;
 - заходи захисту у разі непрямого дотику за умов пошкодження ізоляції.
- ЗІЗ- це засіб, призначений для запобігання або зменшення вливу на

працівника небезпечних і/або шкідливих виробничих факторів. ЗІЗ електрозахисний - це засіб, призначений для роботи в ЕУ працівників, які можуть знаходитися під напругою: діелектричний одяг, ЗІЗ ніг, рук, голови,

обличчя і очей (рукавички, ботики, каски, окуляри та ін.). Вимірювальні прилади - ізолювальні штанги, кліщі, покажчики напруги та ін.),

Електрозахисний інструмент - це інструменти і пристосування для безпечного виконання робіт в ЕУ

Захисні організаційні заходи під час виконання робіт в ЕУ - це комплекс вимог щодо працівників та до порядку виконання робіт з метою безпечної експлуатації ЕУ.

ВИСНОВКИ

На основі досвіду, отриманого під час проектування і створення вимірювального пристрою, розробки програмного забезпечення, а також результатів вимірювання і розрахунків, можна зробити наступні висновки:

1. Для визначення параметрів фотоелектричних модулів в польових умовах був розроблений пристрій вперше на основі мікроконтролерної плати Arduino. Цей пристрій бюджетного рівня дозволяє вимірювати характеристики фотоелектричних модулів у реальних польових умовах при змінному рівні сонячної радіації. У якості навантаження модулів було сконструйовано магазин опорів, комутація яких відбувається за допомогою лінійки електронних реле. Програмне забезпечення здійснює управління резисторами і завдяки комбінаціям включених і виключених реле, можна отримати 1253 значення опору від 1 Ом до 660 Ом. Управління вимірювальної схемою, збір експериментальних даних і передача їх на комп'ютер здійснюється мікроконтролерною платою Arduino Mega 2560. Високу точність вимірювання напруги та струму забезпечують два 16-бітних аналогово-цифрових перетворювачів Adafruit ADS1115, які мають дискретність вимірювання напруги в 0,1 мВ і підключається до мікроконтролера через I²C.
2. Створена в даній роботі вимірювальна система на основі мікроконтролерної плати дозволяє швидко і з високим ступенем точності отримувати ВАХ фотомодулів. Завдяки короткому інтервалу між відліками (порядку 35-60 мс), середній час вимірювання повної ВАХ становить від 1 с до 5 с (в залежності від кількості експериментальних даних і кількості додаткових підключених датчиків). Прилад дає можливість вимірювати будь-які фотоелектричні модулі потужністю до 150 Вт. Система дозволяє підключати зовнішній піранометр та датчики температури і освітлення. Це дає можливість отримувати залежність ВАХ при змінних умовах сонячної радіації і температури, та проводити тестування фотомодулів в польових умовах на ФЕС.

3. Актуальність розробки даної вимірювальної системи полягає в тому, що вона дозволяє проводити тестування та діагностику поточного стану фотомодулів, а також визначати фактичні електричні параметри фотомодулів, які необхідні для задач оптимізації проектних рішень для ФЕС. Окремими задачами, які можуть вирішуватися за допомогою розробленої системи, являються визначення дефектного модулю в масиві, ступеня старіння модулів, прогнозування терміну їх служби.
4. Набір параметрів, який визначається за допомогою розробленої системи, є більш повним, ніж той, який надається в технічних описах до фотомодулів. Саме ці параметри дозволяють правильно визначити електричні характеристики ФМ, які не надаються виробниками, а також отримувати залежності цих характеристик від зовнішніх факторів: рівня сонячної радіації, температури, часткового затінення та інших. Розроблений алгоритм не тільки дає стійке вирішення нелінійних рівнянь, а і здійснює автоматичний підбір стартових точок для забезпечення найменшого середньо-квадратичного відхилення модельної функції від експериментальних даних.
5. Розроблена програма дозволяє легко, швидко і зручно проводити підключення до мікроконтролера, здійснювати виміри, керувати налаштуваннями роботи приладу, зберігати і керувати отриманими даними і визначати базові параметри на основі отриманих кривих ВАХ. Програма значно прискорює проведення експериментів і реалізує велику кількість різноманітних функцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. B. Nehme, N. Sirdi, T. Akiki, and A. Naamane, "Contribution to the modeling of ageing effects in PV cells and modules", *Energy Procedures*, vol. 62, pp. 565–575, 2014.
2. Q.X. Jia, K. Ebiharaand, and T. Ikegami, "Analytical solution for solar cell model parameters from illuminated current-voltage characteristics", *Philosophical MagazineB*, vol.7, pp. 375–382, 1995.
3. E.R. Zuhail, Z. Rouabah, G. Kizilkanetal., "Standard sand Testing Experiments for a Photovoltaic Module", *European Journal of Science and Technology. Special Issue*, pp. 12–15, January 2018
4. Ali M. Humada, "Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 494–509, 2016.
5. M. Bashahu and P. Nkundabakura, "Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors", *Solar Energy*, vol. 81, pp. 856–863, 2007.
6. C. Zhang, J. Zhang,Y. Hao et al., "A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve", *Journal of Applied Physics*, vol. 110 , p. 064504, 2011.
7. А.Ю. Гаевский, "Определение параметров фотоэлектрических модулей на основе точного решения уравнения для ВАХ", *Відновлювана енергетика*, №.4, с.32-39, 2012.
8. K.C. Kong, M. Mamat and M.Z. Ibrahim. "New Approach on Mathematical Modeling of Photovoltaic Solar Panel", *Applied Mathematical Sciences*, vol. 6, pp. 381 – 401, 2012.
9. E.Duran, M.Piliougine, M.Sidrach-de-Cardona, J.Galan, J.M.Andujar "Different methods to obtain the I-V curve of PV module: A review" – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/224445394_Different_methods_to_obtain_the_I-V_curve_of_PV_modules_A_review, 2008.
10. A.Q. Malik, S.J. Bin Haji Damit, "Outdoor testing of single crystal silicon solar cells ", *Renewable Energy*, 28, 2003, pp. 1433-1445

- 11.E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka, E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules", IEEE PVSC, 2002, pp. 1516-1519
- 12.M.M. Mahmoud, "Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I-V characteristics ", Renewable Energy, 31, 2006, pp. 2198- 2206
- 13.Y. Kuai, S. Yuvarajan, "An electronic load for testing photovoltaic panels", Journal of Power Sources, 154, 2006, pp. 308-313.
- 14.M. A. de Blas, J. L. Torres, E. Prieto, A. García, "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices", Renewable Energy, 25, 2002, pp. 371-380.
- 15.M.G. Gunvench, C. Gurcan et al., "Solar simulator and I-V measurement system for large area solar cell testing", Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, 2004.
- 16.E. Durán, J.M. Enrique, M.A. Bohórquez, M. Sidrach- de-Cardona, J.E. Carretero, J.M. Andújar, "A new Application of the Coupled-Inductors SEPIC Converter to obtain I-V and P-V Curves of Photovoltaic Modules", 11th EPE, 2005.
- 17.E. Durán, J. Galán, M. Sidrach-de-Cardona, "Interleaved DC-DC converters to obtain the I-V characteristic curve of PV modules", 22th Eur. Phot. Solar Energy Conference, 2007, pp. 318-321.
- 18.E.Duran, M.B. Ferrera, J.M. Andújar, M.S. Mesa, "I-V and P-V Curves Measuring System for PV Modules based on DC-DC Converters and Portable Graphical Environment" — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/224195822_I-V_and_P-V_curves_measuring_system_for_PV_modules_based_on_DC-DC_converters_and_portable_graphical_environment, 2010.
- 19.В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л. Наука, 1989. - 310 с.
- 20.A. Woyte, J. Nijs, R. Belmans. "Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature survey and field results", Solar Energy, vol.74, pp.217–233, 2003.

- 21.A. Gaevskii. "Method for determining parameters of PV modules in field conditions", 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems, Kyiv, Ukraine, 2019.
- 22.Risen Solar Technology, "Risen RSM 60-6-280P Data sheet" – Режим доступу: <http://www.risenenergy.com/index.php?c=show&id=264>, 2019
- 23.SunRise SolarTech, "SunRise M536100 Datasheet" – Режим доступу: <https://www.stathisnet.gr/image/SpecsUpload/010677.pdf>, 2019
- 24.Л.Д. Третякова. «Охорона праці та цивільний захист», Курс лекцій для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 2018 р.
- 25.Kipp&Zonnen Corp., "Kipp&Zonnen SP-Lite Silicon EX Sense" – Режим доступу: <https://www.kippzonen.com/Product/9/SP-Lite2-Pyranometer#.XP1NAS9t5QJ>.
- 26."DHT11 Data Sheet" – Режим доступу: <https://www.mouser.com/ds/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>, 2019.
- 27."GY-302 BH1750FVI Data Sheet" – Режим доступу: <https://www.elehouse.com/elehouse/images/product/Digital%20light%20Sensor/bh1750fvi-e.pdf>, 2019.
- 28."MATLAB Support Package for Arduino Hardware" – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47522-matlab-support-package-for-arduino-hardware>, 2019.
- 29.Arduino – програмне забезпечення "Arduino IDE" – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>, 2019.
- 30.MathWorks – програмне забезпечення "MATLAB 2018a" – Режим доступу: <https://www.mathworks.com>, 2019.
- 31.Arduino – "Arduino Mega 2560" – Режим доступу: <https://store.arduino.cc/mega-2560-r3>, 2019.
- 32.Texas Instruments – "Adafruit ADS1115 Data Sheet" – Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>, 2019

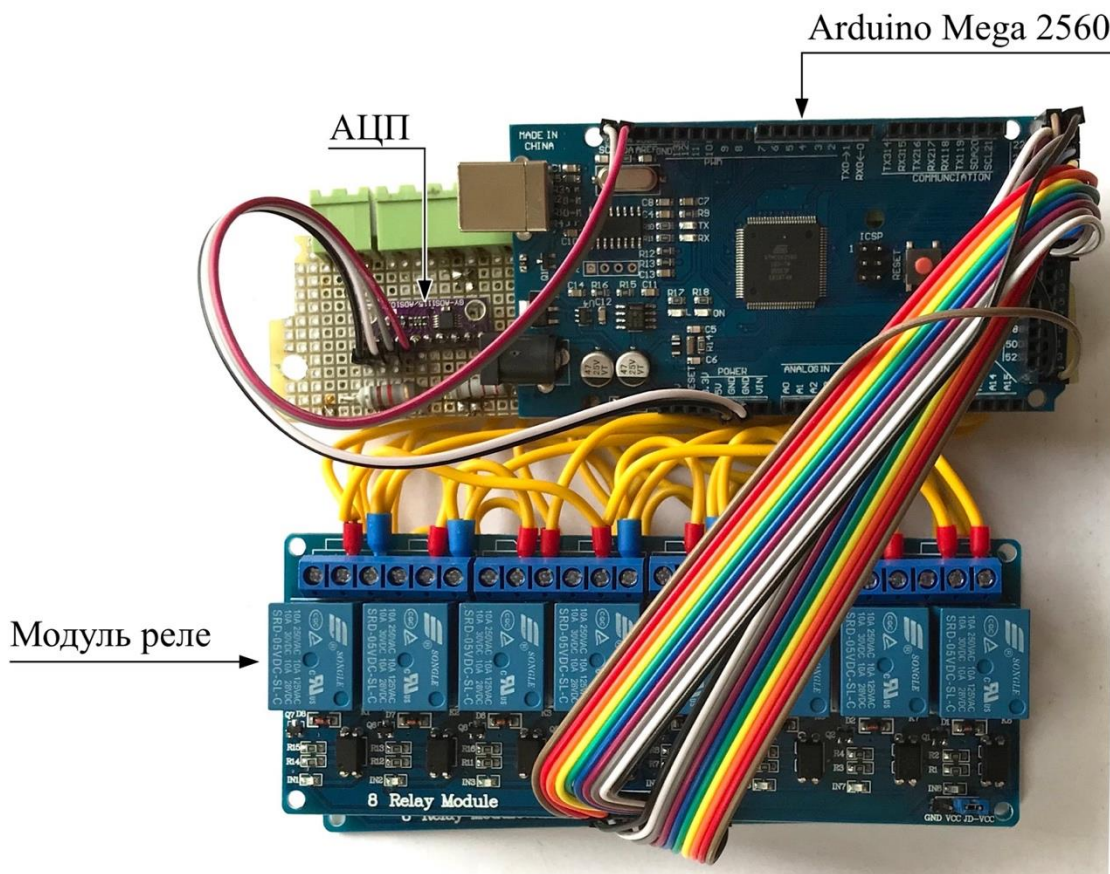


Рисунок А.1 – Вимірювальний пристрій без корпусу

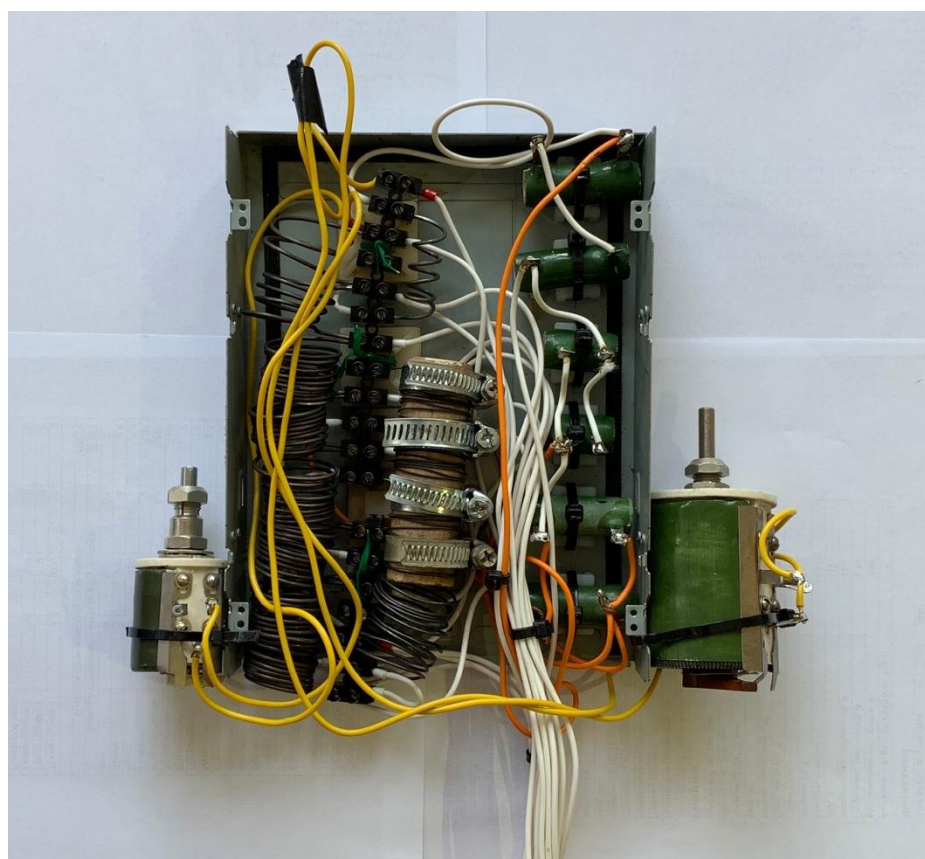


Рисунок А.2 – Магазин резисторів з 16-ма опорами

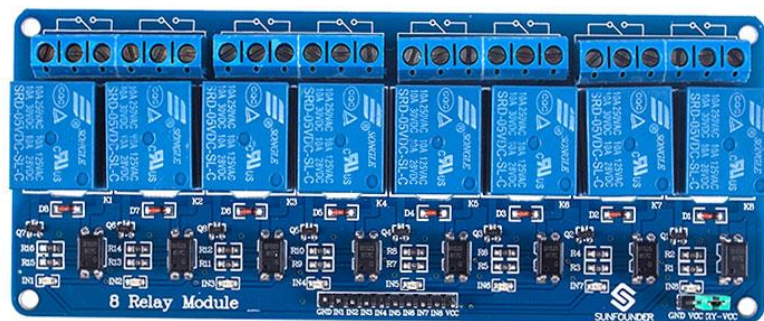


Рисунок А.3 – Модуль з 8-ми електромагнітних реле з опторозв’язкою

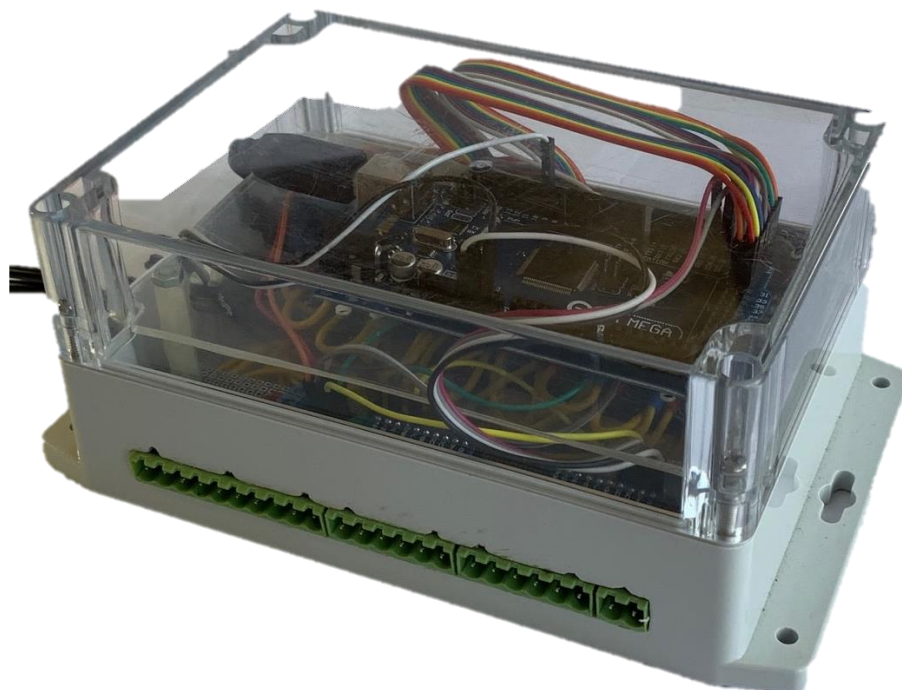


Рисунок А.4 – Зовнішній вигляд приладу без підключеного магазину опорів

Функція Combination для керування реле

```
function combination(app, combi)
    measure(app);
    R1 = [];
    combi = flip(combi);
    for i = 1:length(combi)
        combi = convertStringsToChars(combi);

        if i~= 1
            code1 = code;
        end
        code = num2cell(combi{i});
        code = flip(code);
        pins = [0.7 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.4 0.6 1.7 1.9 1.7 7.6 21.1
596];
        R = 0;
        for n = 1:16
            if str2num(cell2mat(code(n))) == 0
                x = 0;
            else
                x = 1;
            end
            if i~=1 && str2num(cell2mat(code(n))) ~=
str2num(cell2mat(code1(n)))
                writeDigitalPin(app.a,app.R(n),x);
                app.relayLamps{n}.Color = [0 x 0];
            elseif i==1
                writeDigitalPin(app.a,app.R(n),x);
                app.relayLamps{n}.Color = [0 x 0];
            end
            R = R + pins(n)*x;
        end
        R1 = [R1, R];
        pause(app.timeDelay);
        measure(app);
    end
end
```

Функція Series

```
function series(app)
    measure(app);
    for i = 1:16
        writeDigitalPin(app.a,app.R(i),0);
        app.relayLamps{i}.Color = [0 1 0];
        pause(app.timeDelay);
        measure(app);
    end
end
```

Функція Measure

```
function measure(app)
    if app.isRadiation == false
        app.Uraw = [app.Uraw, readRegister(app.ADS{1},0,'int16')];
        app.Iraw = [app.Iraw, -readRegister(app.ADS{2},0,'int16')];
    else
        app.Uraw = [app.Uraw, readRegister(app.ADS{1},0,'int16')];
        app.Iraw = [app.Iraw, -readRegister(app.ADS{2},0,'int16')];
        if app.useComparator == true
            writeRegister(app.ADS{2},1,app.configs(3),'uint16');
        else
            writeRegister(app.ADS{2},1,app.configs(5),'uint16');
        end
        app.Vraw = [app.Vraw, -readRegister(app.ADS{2},0,'int16')];
        if app.useComparator == true
            writeRegister(app.ADS{2},1,app.configs(2),'uint16');
        else
            writeRegister(app.ADS{2},1,app.configs(4),'uint16');
        end
    end
end
```

Функція Configure

```
function config(app)
    if app.useComparator == true
        writeRegister(app.ADS{1},1,app.configs(1),'uint16');
        writeRegister(app.ADS{2},1,app.configs(2),'uint16');
    else
        writeRegister(app.ADS{1},1,app.configs(1),'uint16');
        writeRegister(app.ADS{4},1,app.configs(2),'uint16');
    end
end
```

Функція Combination для генерації можливих значень опорів

```
clc;
clear all;
pins = [14.6 0.15 0.3 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 1.8 2.1 2.1 7.6 21.2 596.5];
o = [];
R = [];
for i = 1:65536
    o = [o; dec2bin(i-1, 16)];
    sum = 0;
    for j = 1:length(pins)
        if o(i,j) == '1'
            sum = sum + pins(j);
        end
    end
    R = [R, sum];
end
R = unique(R);
I = [];
for i = 1:length(R)
    I = [I; 50/R(i)];
end
figure(1)
hold on;
grid on;
xlim([0 20]);
ylim([0 6]);
for i = 1:length(R)
    plot([0 50],[0 I(i)], 'LineWidth', 1);
end
```

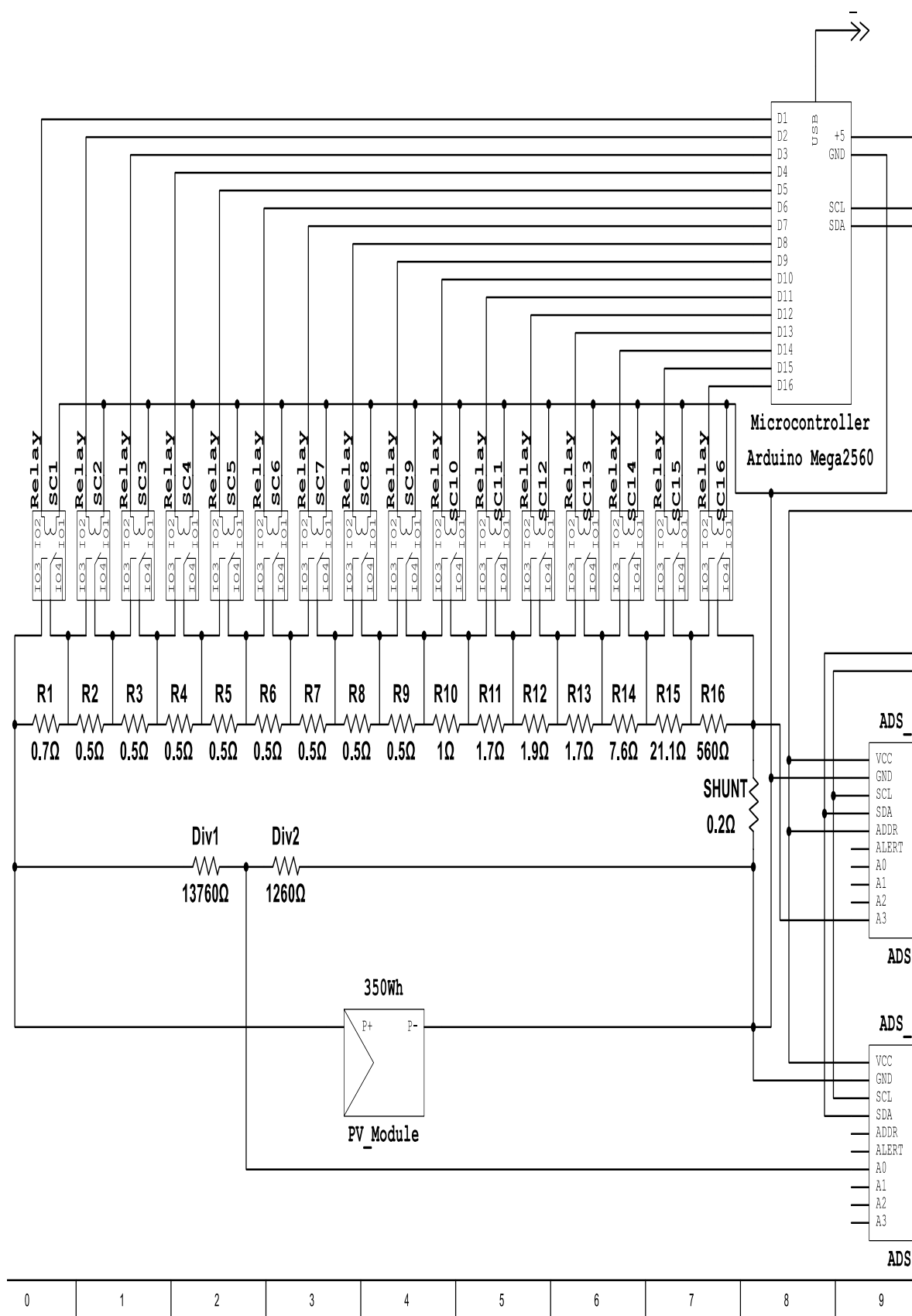


Рисунок В.1 – Детальна електрична схема вимірювального приладу створеного в програмі National Instruments MultiSim 14

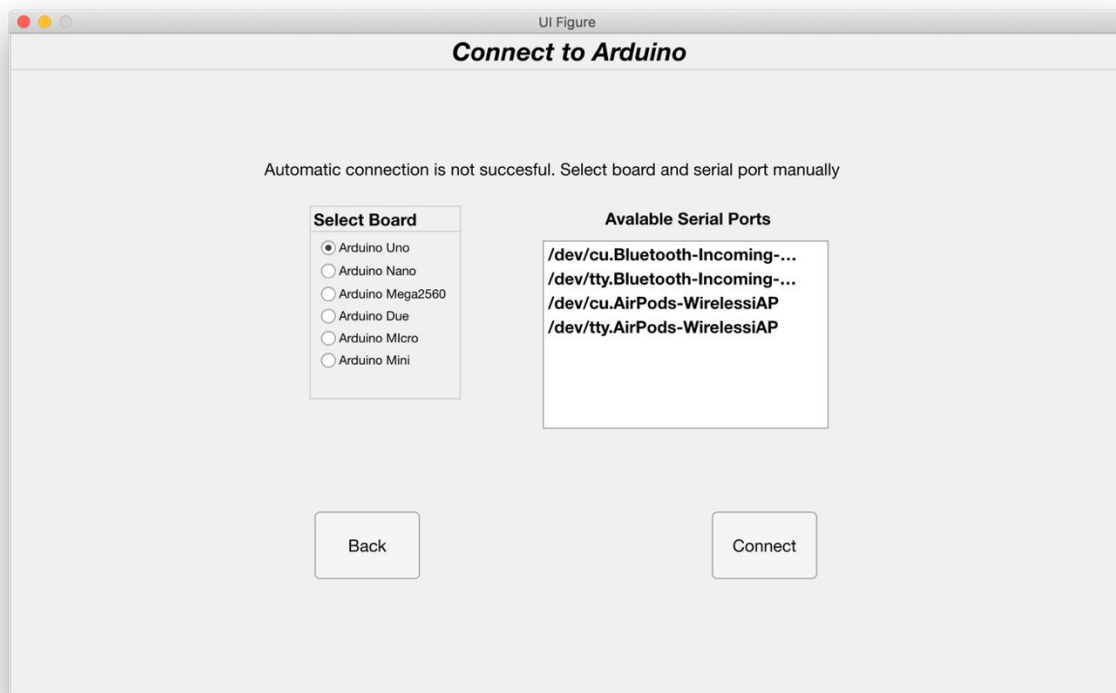


Рисунок Г.1 – Інтерфейс панелі “Connect”

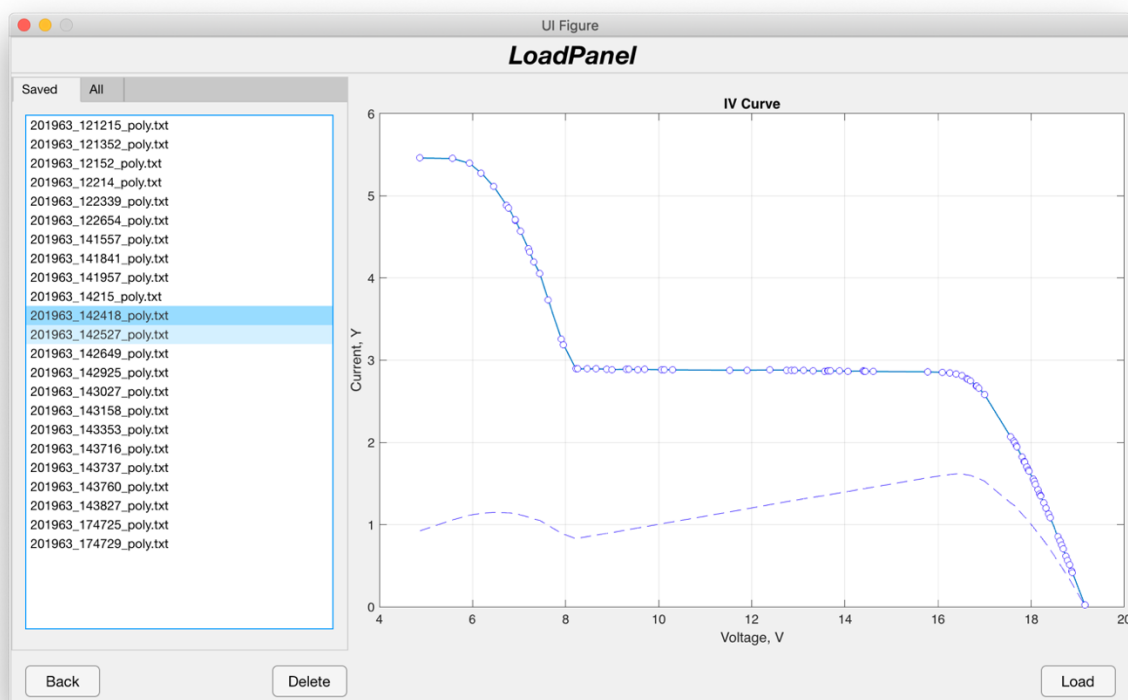


Рисунок Г.2 – Інтерфейс панелі “Load”

Таблиця Е.1 – Опис конфігурування поля регістру АЦП ADS1115

Bit	Field	Type	Reset	Description
15	OS	R/W	1h	Operational status or single-shot conversion start This bit determines the operational status of the device. OS can only be written when in power-down state and has no effect when a conversion is ongoing. When writing: 0 : No effect 1 : Start a single conversion (when in power-down state) When reading: 0 : Device is currently performing a conversion 1 : Device is not currently performing a conversion
14:12	MUX[2:0]	R/W	0h	Input multiplexer configuration (ADS1115 only) These bits configure the input multiplexer. These bits serve no function on the ADS1113 and ADS1114. 000 : AIN _P = AIN0 and AIN _N = AIN1 (default) 001 : AIN _P = AIN0 and AIN _N = AIN3 010 : AIN _P = AIN1 and AIN _N = AIN3 011 : AIN _P = AIN2 and AIN _N = AIN3 100 : AIN _P = AIN0 and AIN _N = GND 101 : AIN _P = AIN1 and AIN _N = GND 110 : AIN _P = AIN2 and AIN _N = GND 111 : AIN _P = AIN3 and AIN _N = GND
11:9	PGA[2:0]	R/W	2h	Programmable gain amplifier configuration These bits set the FSR of the programmable gain amplifier. These bits serve no function on the ADS1113. 000 : FSR = $\pm 6.144 \text{ V}^{(1)}$ 001 : FSR = $\pm 4.096 \text{ V}^{(1)}$ 010 : FSR = $\pm 2.048 \text{ V}$ (default) 011 : FSR = $\pm 1.024 \text{ V}$ 100 : FSR = $\pm 0.512 \text{ V}$ 101 : FSR = $\pm 0.256 \text{ V}$ 110 : FSR = $\pm 0.256 \text{ V}$ 111 : FSR = $\pm 0.256 \text{ V}$
8	MODE	R/W	1h	Device operating mode This bit controls the operating mode. 0 : Continuous-conversion mode 1 : Single-shot mode or power-down state (default)
7:5	DR[2:0]	R/W	4h	Data rate These bits control the data rate setting. 000 : 8 SPS 001 : 16 SPS 010 : 32 SPS 011 : 64 SPS 100 : 128 SPS (default) 101 : 250 SPS 110 : 475 SPS 111 : 860 SPS
4	COMP_MODE	R/W	0h	Comparator mode (ADS1114 and ADS1115 only) This bit configures the comparator operating mode. This bit serves no function on the ADS1113. 0 : Traditional comparator (default) 1 : Window comparator
3	COMP_POL	R/W	0h	Comparator polarity (ADS1114 and ADS1115 only) This bit controls the polarity of the ALERT/RDY pin. This bit serves no function on the ADS1113. 0 : Active low (default) 1 : Active high
2	COMP_LAT	R/W	0h	Latching comparator (ADS1114 and ADS1115 only) This bit controls whether the ALERT/RDY pin latches after being asserted or clears after conversions are within the margin of the upper and lower threshold values. This bit serves no function on the ADS1113. 0 : Nonlatching comparator. The ALERT/RDY pin does not latch when asserted (default). 1 : Latching comparator. The asserted ALERT/RDY pin remains latched until conversion data are read by the master or an appropriate SMBus alert response is sent by the master. The device responds with its address, and it is the lowest address currently asserting the ALERT/RDY bus line.
1:0	COMP_QUE[1:0]	R/W	3h	Comparator queue and disable (ADS1114 and ADS1115 only) These bits perform two functions. When set to 11, the comparator is disabled and the ALERT/RDY pin is set to a high-impedance state. When set to any other value, the ALERT/RDY pin and the comparator function are enabled, and the set value determines the number of successive conversions exceeding the upper or lower threshold required before asserting the ALERT/RDY pin. These bits serve no function on the ADS1113. 00 : Assert after one conversion 01 : Assert after two conversions 10 : Assert after four conversions 11 : Disable comparator and set ALERT/RDY pin to high-impedance (default)