

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

«Високоєфективна автономна система електроживлення установки переробки  
полімерних відходів у дизпаливо»

Назва

КвРАКІТ.2022169.01.12 ПЗ

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Шифр, назва

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Назва

Виконав:

студент 2 курсу, група АКІТм-22

Підпис

Артур СЛИВА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри: д-р техн.  
наук, проф.

Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

21 12 2023 р.

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

АКТГ та Р  
В. Мергелішвілі  
« 01 » 09 2023р.

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Сливі Артуру Анатолійовичу

1 Тема роботи: Високоєфективна автономна система електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н, професор.

Затверджено наказом по університету від «15» 08 2023р. № 30.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2023р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.) Мета роботи: дослідження є створення високоєфективної автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо. Предметом дослідження є методи та засоби підвищення ефективності використання сонячних панелей у складі автономних систем електроживлення

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. Аналіз відомих автономних систем електроживлення.

Модель автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо та розрахунок її параметрів. Алгоритми та технологія для моделювання системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо. Реалізація автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо та розрахунок її параметрів.

Висновки.





Завдання отримав

AS

Науковий керівник

AS

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагиат	Микола ФЕДУЛА, доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Людмила КОРЕЦЬКА, доц. кафедри АКІТтаР		

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	10.09.2023р.	Виконано
2	Аналіз відомих автономних систем електроживлення	25.09.2023р.	Виконано
3	Модель автономної системи електроживлення установки	15.10.2023р.	Виконано
4	Алгоритми та технології для моделювання системи	30.10.2023р.	Виконано
5	Реалізація автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо та розрахунок її параметрів	10.11.2023р.	Виконано
6	Висновки	15.11.2023р.	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2023р.	Виконано
8	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2023р.	Виконано

Студент



Підпис



Ім'я, прізвище

Керівник роботи



Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Високоєфективна автономна система електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо».

Автор роботи: Слива Артур Анатолійович.

Керівник роботи: Мартинюк Валерій Володимирович.

Пояснювальна записка: 80 с., 49 рис., 3 табл., 3 дод., 44 джерел.

Графічна частина: 17 презентаційних слайдів.

АВТОНОМНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, НАДІЙНІСТЬ, MATLAB, MUDBUS, МОДЕЛЮВАННЯ, СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА.

**Мета роботи:** дослідження та створення високоєфективної автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо. Показано, що показники вихідної потужності моделі автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо співпадають з реальними параметрам сонячних панелей, та показано необхідність наявності автономних систем електроживлення.



Підпис студента

15.12.2023

Дата

## Зміст

ВСТУП .....	6
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ.....	9
1.1 Структура і класифікація автономної системи електроживлення.....	9
1.2 Аналіз програмних засобів моделювання автономної система електроживлення.....	13
1.3 Аналіз відомих методів оптимізації автономної системи електроживлення	17
Висновки до першого розділу.....	19
2 МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ДИЗПАЛИВО ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ПАРАМЕТРІВ .....	21
2.1 Формальна модель автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо .....	21
2.2 Фотоелектричне перетворення у системі електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо .....	24
2.3 Цифровий двійник фотоелектричної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо .....	28
Висновки до другого розділу.....	35
3 АЛГОРИТМИ ТА ТЕХНОЛОГІЯЇ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ДИЗПАЛИВО.....	37
3.1 Алгоритм розрахунку системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо .....	37
3.2 Розробка моделі системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо в середовищі Simulink.....	41
3.3 Моделювання процесу відслідковування точки максимальної потужності ..	48
Висновки до третього розділу .....	55

4	РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ДИЗПАЛИВО ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ПАРАМЕТРІВ .....	58
4.1	Вибір середовища розробки та мови програмування.....	58
4.2	Опис компонентів програмного засобу імітаційної моделі.....	60
4.3	Опис інтерфейсу користувача та інструкції із використання .....	62
4.4	Імітаційне моделювання сонячної електростанції .....	67
	Висновки до четвертого розділу.....	73
	ВИСНОВКИ.....	74
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	76
	Додаток А .....	80
	Додаток Б.....	90
	Додаток В .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## ВСТУП

Відключення електрики показало що системи не повинні покладатися лише на зовнішнє електроживлення. Особливо якщо мова йде про мобільні системи які в більшості випадків будуть працювати в місцях без постійного живлення. Виходом із цієї ситуації стали генератори та акумулятори, але ці системи вимагають додаткових витрат та доступу до електроживлення перед використанням або перед перевезенням системи в інші місця. Саму у таких ситуаціях найкращим варіантом стануть альтернативні джерела енергії.

Пошук альтернативних джерел енергії за останні роки набув особливої актуальності. Причинами цього стали страх перед глобальним потеплінням, а також пошук більш дешевих та доступних джерел енергії. Енергія сонячного випромінювання – безкоштовна, доступна усім, та дозволяє генерувати абсолютно екологічно чисту електроенергію не створюючи забруднення навколишнього середовища і має найменший карбоновий слід на одиницю згенерованої енергії. Ураховуючи це, на сьогодні сонячна енергетика є однією з найбільш перспективних галузей альтернативної енергетики, що швидко розвивається і має неймовірний потенціал.

Актуальність теми. Актуальність роботи обумовлена зростанням попиту на використання сонячних панелей як додаткового джерела живлення для різноманітних систем. Оптимальна виробнича потужність сонячних панелей не є постійною і піддана впливу різноманітних факторів, таких як інтенсивність сонячного випромінювання, температура, кут нахилу та орієнтація панелі до сонця, навантаження і інші. Ефективність систем які використовують сонячні панелі можна підвищити за рахунок використання систем відслідковування точки максимальної потужності та систем відстеження положення сонця. На сучасному етапі існує різноманіття засобів оптимізації роботи систем, що використовують сонячні батареї та ґрунтуються на різних методах та алгоритмах. Однак у більшості випадків вартість цих засобів надто висока для домашнього використання. Тому

більшість систем використовують лише контролери заряду, які автоматично відслідковують найкращі точки, які б дозволили підвищити ефективність вироблення електроенергії малими сонячними електростанціями при мінімальних затратах. Важливим етапом у процесі розробки є використання імітаційного моделювання за допомогою комп'ютерної техніки. Цей підхід має ряд переваг, оскільки вимагає мінімальних витрат на обладнання і надає розробникові розширений арсенал інструментів для роботи. Таким чином, створення імітаційної моделі для відслідковування оптимальної робочої точки сонячних панелей є актуальною задачею.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є створення високоефективної автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо..

– Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені наступні задачі:

- аналіз існуючих засобів підвищення ефективності систем електроживлення;
- аналіз існуючих програмних засобів для імітаційного моделювання;
- розробка математичної моделі сонячної панелі;
- підтвердження достовірності моделі шляхом аналізу отриманих результатів із експериментальними;
- розробка засобів оптимізації роботи сонячних панелей;
- розробка моделі високоефективної автономної система електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо.

Об'єктом дослідження є системи моделювання та процес фотоелектричного перетворення енергії в сонячних панелях.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення ефективності використання сонячних панелей у складі автономних систем електроживлення.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використовувалися різноманітні методи дослідження. Зокрема, застосовувалися методи теорії електричних кіл для аналізу та моделювання системи. Комп'ютерне

моделювання використовувалося для візуалізації та аналізу результатів у різних умовах. Також важливим етапом було використання методів алгоритмізації та моделювання для розробки відповідного модельного забезпечення, що дозволило ефективно виконувати обчислення та реалізовувати необхідні алгоритми. Використання цих різноманітних методів дослідження дозволило систематично та комплексно дослідити та розв'язати поставлені завдання у роботі.

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблено модель для аналізу показників сонячних панелей, яку можна буде використовувати студентам для отримання базового розуміння роботи із сонячними панелями;
- інтегровано відновлюване джерело енергії у систему електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо;
- було підтверджено відповідність показників програмного забезпечення для моделювання.

Практичне значення отриманих результатів.

У магістерській роботі було виявлено, що використання засобів імітаційного моделювання є доцільним у процесі проектування засобів оптимізації сонячних панелей. Розглянута методика розрахунку параметрів та моделювання характеристик сонячних може бути використана для розробки та тестування алгоритмів відслідковування точки максимальної потужності.

Отримані результати дозволили розробити функціонуючу модель для імітаційного моделювання систем із використанням автономних джерел електроживлення. Ця модель відкриває можливості для подальшого дослідження та вдосконалення алгоритмів, спрямованих на підвищення ефективності сонячних систем, а також для використання в практичних застосуваннях у галузі відновлювальної енергетики та освіти.

Публікації: Слива А. А., Федула М. В., Мартинюк В. В. Аналіз нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* №4 2023р.

# 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

## 1.1 Структура і класифікація автономної системи електроживлення

Автономні системи електроживлення є важливими складовими сучасних інфраструктур і систем, забезпечуючи надійне електроживлення в умовах відключень електромережі, екстрених ситуацій та в умовах, коли стійке живлення необхідне для безперебійної роботи критичних систем. [1]

Структура автономних систем електроживлення визначається головним чином їхніми функціональними компонентами, які дозволяють системі надійно забезпечувати електроживлення в умовах відключень електромережі або при необхідності постійного живлення віддалених об'єктів.[2]

Основні компоненти структури системи електроживлення включають:

1. Джерела живлення: цей компонент відіграє ключову роль у структурі системи живлення, оскільки визначає, звідки система отримує електричну енергію. Джерела енергії можуть включати в себе різні технології:

- сонячні панелі: використовують сонячне випромінювання для генерації електроенергії рисунок 1.1;
- дизельні генератори: використовуються для виробництва електроенергії з використанням дизельного пального рисунок 1.2;
- вітрові турбіни: генерують електроенергію за допомогою вітрового потоку.
- акумуляторні системи: зберігають електроенергію для подальшого використання.

2. Керування та моніторинг: цей компонент відповідає за керування та моніторинг системи. Він включає в себе різні підсистеми:

- керування джерелами енергії: забезпечує оптимальну роботу джерел енергії, включаючи запуск, зупинку і регулювання потужності;
- моніторинг стану системи: слідкує за станом компонентів системи живлення, виявляє перебої та виконує діагностику;

- управління навантаженням: керує розподілом енергії між споживачами та може призначати пріоритети різним навантаженням в разі обмеженого живлення.

3. Передача та розподіл енергії: цей компонент включає в себе інфраструктуру для передачі та розподілу електроенергії до кінцевих споживачів. Важливі елементи включають:

- розподільні шафи: вони відокремлюють і розподіляють електроенергію до різних груп споживачів;
- кабельні мережі: забезпечують транспортування електроенергії від джерела до споживачів;
- захисні пристрої: забезпечують безпеку системи, включаючи захист від короткого замикання і перевантаження.

Ці компоненти працюють в комплексі, забезпечуючи надійне і стабільне електроживлення в умовах, коли це особливо важливо, такі як в критичних інфраструктурних об'єктах, віддалених районах, або в екстрених ситуаціях. Архітектура та розташування цих компонентів може варіюватися в залежності від конкретного застосування і потреб користувача. [3]

Класифікація автономних систем електроживлення зазвичай здійснюється на основі різних критеріїв, які враховують тип джерела енергії, масштаб застосування, час автономності та інші фактори. [4] Нижче розглянемо деякі з основних критеріїв класифікації автономних систем електроживлення:

#### 1. Тип джерела енергії:

- дизельні генератори: ці системи використовують дизельні генератори як основне джерело енергії. Вони добре підходять для критичних додатків, оскільки можуть надавати стабільне живлення під час тривалих відключень електромережі;
- акумуляторні системи (автономні системи електроживлення на акумуляторах): вони використовують акумулятори для зберігання електроенергії, яку можна використовувати у разі потреби. Це дозволяє згладити піки навантаження та забезпечити резервне живлення;

– екологічні, зелені системи: ці системи використовують вітрові турбіни для генерації електроенергії з вітрового потоку або сонячні панелі для збору сонячної енергії та її перетворення в електроенергію. В більшості випадків для максимальної продуктивності вони застосовуються одночасно.

– змішані: ці системи використовують декілька джерел енергії, та є найбільш досконалими, рисунок 1.3;

## 2. Масштаб застосування:

– малий масштаб: малі автономні системи електроживлення використовуються для житлових будівель, квартир, віддалених освітлювальних систем та окремих пристроїв, індивідуальних суден тощо. Зазвичай до кількох десятків кіловат, рисунок 1.1;



Рисунок 1.1 – Автономна системи електроживлення вуличного освітлення

– середній масштаб: такі системи призначені для комерційних об'єктів, невеликих підприємств, сільськогосподарських комплексів та малих міст. Від кількох десятків кіловат до кількох сотень кіловат;



Рисунок 1.2 – Генератор потужністю 88кВт, встановлений біля магазину

– великий масштаб: великі автономні системи електроживлення встановлюються для промислових об'єктах, лікарень, аеропортів та інших критичних об'єктів.

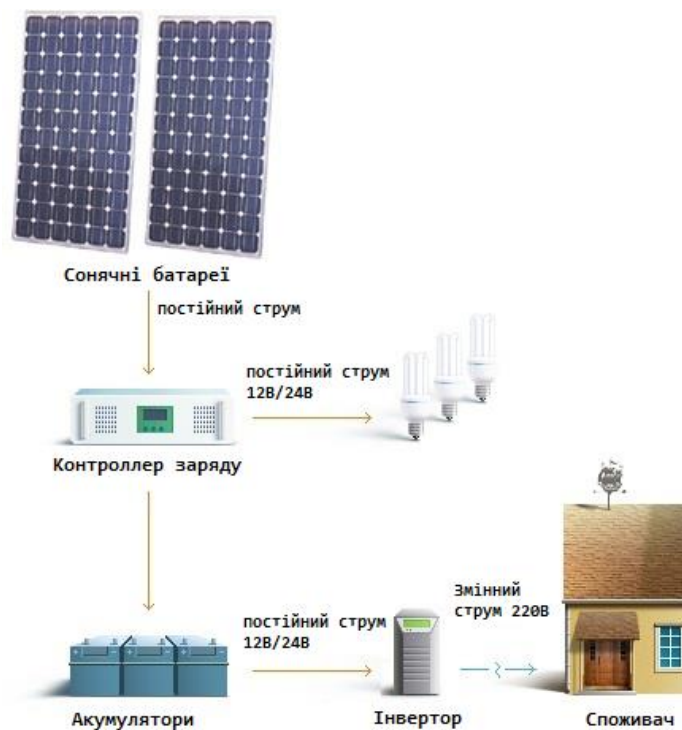


Рисунок 1.3 – Структурна схема автономної сонячної електростанції

### 3. Час автономності:

- короткий час автономності: деякі автономні системи електроживлення розраховані на короткий період автономної роботи, наприклад, кілька годин. Вони можуть бути використані для підтримки живлення під час тимчасових відключень;
- середній час автономності: такі системи можуть працювати автономно від кількох годин до декількох діб і часто використовуються на невеликих підприємствах та в окремих будівлях;
- довгий час автономності: деякі автономні системи електроживлення розраховані на тривалий час автономної роботи, можуть забезпечувати електроживлення протягом декількох тижнів або навіть місяців. Вони використовуються на віддалених об'єктах, де доступ до електромережі обмежений або взагалі відсутній.

## 1.2 Аналіз програмних засобів моделювання автономної система електроживлення

Розрахунок автономної системи електроживлення дозволяє точно визначити обсяги електроенергії, яку буде генерувати система для конкретних умов місцевості, при умові, що всі її компоненти будуть встановлені та підключені належним чином. Інструменти для моделювання автономних систем електроживлення базуються на математичних рівняннях, які дозволяють розрахувати вхідну та вихідну потужність для встановлених елементів системи, щоб на основі цих даних створити погодинний графік генерації та споживання електроенергії для автономної системи.[5, 6] Інструменти для розрахунку і моделювання автономних систем електроживлення використовуються для вирішення різноманітних завдань:

- розробки проектів електрифікації нових об'єктів;
- оптимізації монтажу та експлуатації вже існуючих автономних систем електроживлення;

- проведення попередніх розрахунків для укладення контрактів або підготовки комерційних пропозицій;
- розрахунку коефіцієнта корисної дії встановленої системи. Узгодження взаємодії автономної системи електроживлення з енергосистемою загального користування;
- виконання енергетичних розрахунків та тестів.

Існують програмні засоби для моделювання та розрахунку автономних систем живлення, які враховують різні компоненти, такі як акумулятори, дизельні генератори та сонячні батареї, проте більшість подібних програм будуть враховувати лише кілька параметрів. Подібні програми дозволяють інженерам і дослідникам проектувати та аналізувати складні системи автономного живлення, враховуючи різні джерела енергії та умови експлуатації. Нижче я наведу декілька популярних програм для моделювання таких систем:

- HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) рисунок 1.4: HOMER є однією з найвідоміших програм для моделювання гібридних систем живлення, які враховують сонячні батареї, акумулятори та інші джерела енергії. Вона дозволяє виконувати оптимізацію системи для досягнення найкращих економічних показників;
- RETScreen: RETScreen рисунок 1.5 - це безкоштовна програма для аналізу проектів поновлюваної енергії та ефективності енергоспоживання. Вона включає модуль "Автономні електроенергетичні системи", який дозволяє моделювати системи з використанням сонячних батарей, акумуляторів та дизельних генераторів;
- PV\*SOL: PV\*SOL рисунок 1.6 - це програма для проектування та моделювання сонячних електростанцій. Вона враховує сонячні панелі, акумулятори та може інтегрувати дизельні генератори для створення автономних систем живлення;
- SAM (System Advisor Model): Ця програма розроблена Національною лабораторією поновлюваних джерел енергії (NREL) і враховує різні компоненти

систем автономного живлення, включаючи сонячні панелі, акумулятори та генератори. SAM дозволяє аналізувати вартість та продуктивність системи;

– MATLAB Simulink рисунок 1.7 - це інтегроване середовище моделювання та симуляції, що входить до пакету програмного забезпечення MATLAB, розробленого MathWorks. Simulink дозволяє інженерам та дослідникам моделювати, аналізувати та симулювати різноманітні системи, включаючи системи автономного живлення.

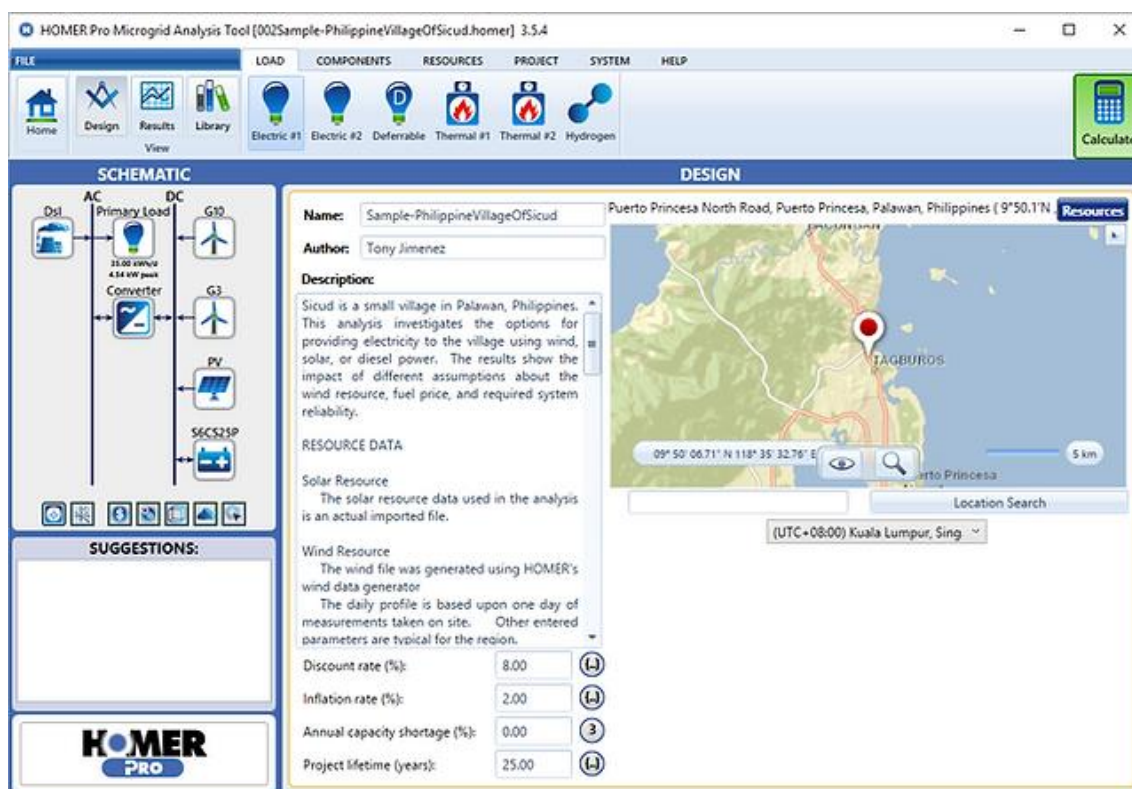


Рисунок 1.4 – Вікно додатку HOMER

Основні характеристики та можливості MATLAB Simulink для моделювання автономних систем живлення включають переваги описані далі в роботі.

Моделювання сонячних батарей - за допомогою Simulink можна моделювати різні характеристики сонячних батарей, включаючи їхню ефективність, вихідні параметри та взаємодію з іншими компонентами системи.

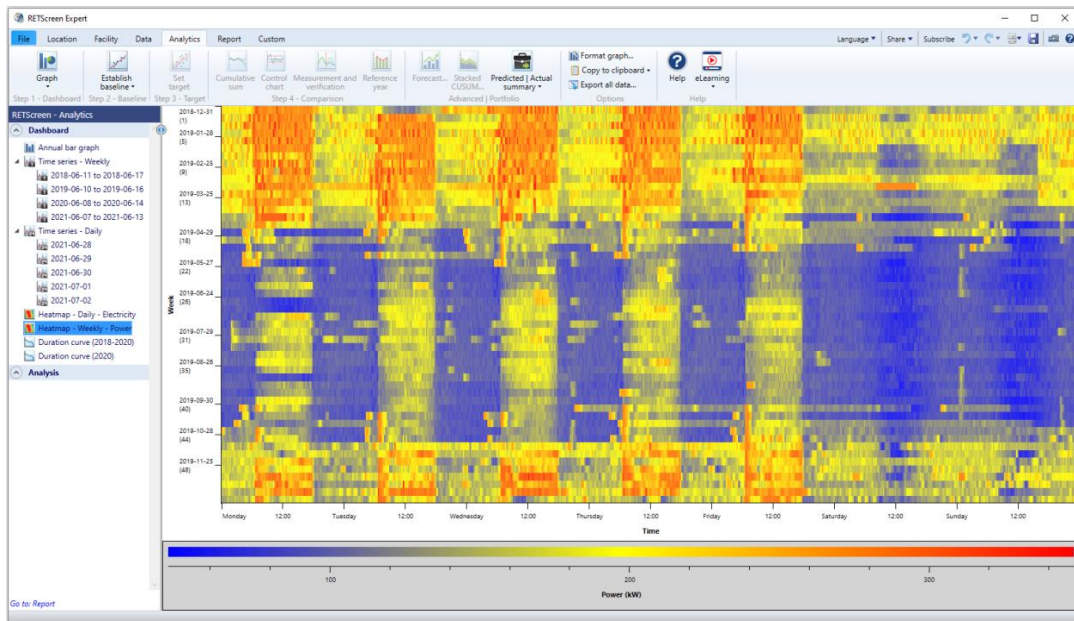


Рисунок 1.5 – Вікно додатку RETScreen

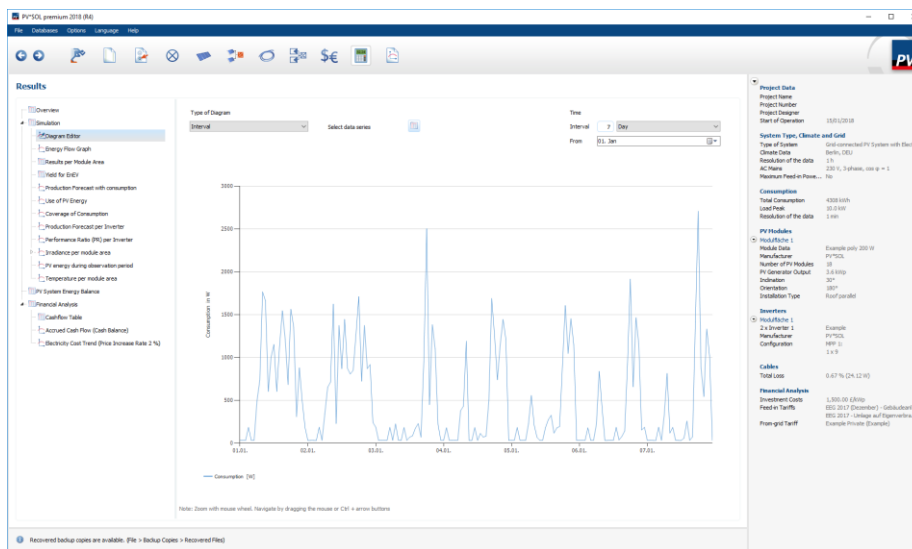


Рисунок 1.6 – Вікно додатку PV\*SOL

Аналіз динамічних систем - Simulink надає засоби для аналізу динаміки системи в часовому домені, що дозволяє вивчати зміни в системі з плином часу.

Симуляція енергетичних систем - Засоби Simulink дозволяють виконувати симуляції автономних систем живлення з різними умовами вводу та різними параметрами компонентів системи.

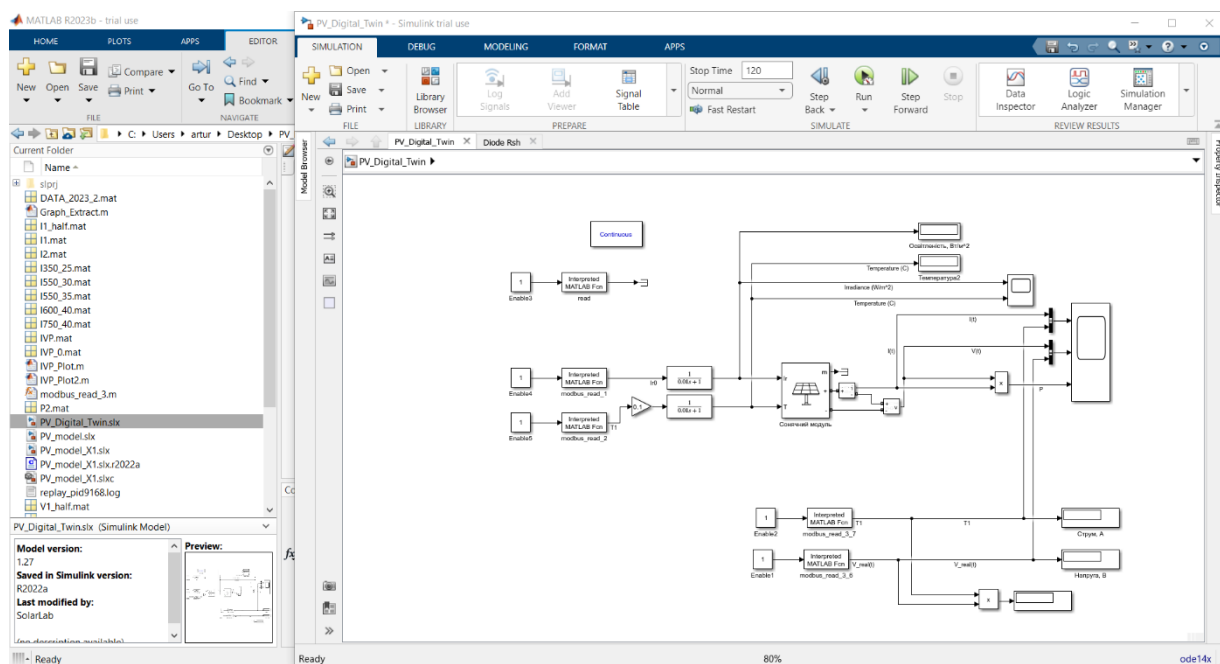


Рисунок 1.7 – Вікно додатку MATLAB та Simulink

Аналіз та візуалізація результатів - Інтеграція з MATLAB дозволяє аналізувати та візуалізувати результати симуляцій, включаючи графіки, діаграми та інші інструменти для розуміння роботи системи.

Реалістичні сценарії - Simulink дозволяє враховувати реалістичні сценарії, такі як зміни в погоді, вартість електроенергії, а також взаємодію зовнішніх факторів.

### 1.3 Аналіз відомих методів оптимізації автономної системи електроживлення

Як було зазначено, існує багато типів автономних систем електроживлення з своїми параметрами, перевагами, та рекомендаціями при встановленні, але для усіх систем автономного електроживлення можна виділити кілька основних кроків для поліпшення ефективності:

- управління навантаженням (Load Management): один з ключових методів полягає в розумному розподілі енергії між різними навантаженнями в системі. Системи управління навантаженням можуть вмикати та вимикати пристрої в залежності від вимог, що дозволяє зменшити споживання енергії. Для

прикладу можна навести також Demand Side Management, або управління попитом, - це стратегія ефективного управління та оптимізації споживання електроенергії з боку користувачів та клієнтів. [7] Головна мета Demand Side Management - це зменшення пікових навантажень, ефективно використовувати ресурсів та зменшення витрат енергії в системах живлення та електромережах;

- використання акумуляторів (Battery Storage): акумулятори можуть зберігати енергію для використання в той час, коли вона найбільше потрібна, або для збереження надлишкової енергії для майбутнього використання. Це дозволяє оптимізувати використання сонячних панелей, вітряків і інших джерел енергії. Наявність акумуляторів дозволяє стабілізувати витрати енергії, та використовувати акумулятори для забезпечення в пікові періоди, що в свою чергу допоможе знизити навантаження на мережу;

- гібридні системи (Hybrid Systems): використання комбінації декількох джерел енергії, таких як сонячні панелі, вітряки і генератори, може забезпечити стабільніше та ефективніше живлення. Системи управління гібридними системами можуть автоматично вибирати джерела енергії в залежності від обставин. Як приклад можна навести інвертор з вбудованою системою контролю – POW-NVM3.2H-24V, в якому можна налаштовувати режим роботи та виставляти пріоритетність джерелу живлення[8];

- система мікро мереж (Microgrids): мікромережі є невеликими автономними мережами електропостачання, які можуть працювати незалежно від централізованих мереж. Вони можуть включати в себе розподіл джерел енергії та ефективно управління споживанням;

- енергоефективні технології (Energy-Efficient Technologies): використання більш енергоефективних пристроїв і технологій, таких як LED-освітлення, теплові насоси, енергозберігаючі устаткування тощо, може допомогти зменшити споживання енергії;

- прогнозування споживання та виробництва енергії (Energy Forecasting): використання алгоритмів прогнозування дозволяє системам електроживлення заздалегідь планувати виробництво та використання енергії відповідно до потреб;

– автоматизовані системи управління (Automated Control Systems): використання сучасних систем управління і контролю, які можуть в реальному часі аналізувати та оптимізувати роботу системи. Система наведення для сонячної панелі, система повороту вітряних електростанцій або система контролю освітлення;

– використання передових матеріалів і технологій (Advanced Materials and Technologies): вдосконалення ефективності сонячних панелей, вітряків та акумуляторів завдяки новим матеріалам і технологіям. Чудовим прикладом можуть стати сонячні панелі які стрімко розвиваються, тим самим роблячи старі панелі не вигідними порівняно з новими, панелі однакового розміру можуть мати розходження максимальної потужності в кілька разів;

– моніторинг та діагностика (Monitoring and Diagnostics): використання систем моніторингу та діагностики для виявлення неполадок та планування технічного обслуговування систем електроживлення. Вчасне виявлення пошкоджень та втрат.

### Висновки до першого розділу

Будь-яка модель високоефективної автономної системи електроживлення, що використовується при аналізі та імітаційному моделюванні, повинна відповідати наступним вимогам:

– опис ВАХ (вольт-амперної характеристики) сонячного елемента забезпечує достатню точність в заданому діапазоні температур та інтенсивності сонячного випромінювання, при цьому враховано вплив умов навколишнього середовища;

– надання можливості використовувати задані користувачем властивості сонячних панелей;

– можливість керувати станом роботи системи;

– робота в режимі реального часу;

– отримання даних напряму від датчиків.

Визначення діапазону змін температури та інтенсивності сонячного випромінювання, а також необхідної точності розрахунків, є завданням, що визначається конкретними вимогами кожної окремої задачі. У випадку аналізу чи моделювання, допущена похибка не повинна виходити за межі допустимих норм. При вивченні вихідних потужностей, точність моделі повинна бути максимальною в точці максимальної вихідної потужності та може бути меншою в крайових точках ВАХ, які відповідають струму короткого замикання та напрузі холостого ходу, оскільки система буде працювати саме у точці максимальної потужності.

У випадках, коли одна модель сонячного елемента не забезпечує достатню точність опису всієї ВАХ, досягнення бажаного результату може вимагати додаткових обчислень з використанням змінених вихідних даних.

Проведений аналіз існуючих програмних продуктів показав, що на ринку платних рішень існує значна кількість програм для моделювання та розрахунку високоефективних автономних систем електроживлення. Вони мають широкий функціонал та можуть задовольнити різноманітні потреби користувачів. Усі вони є платними, тому розробка безкоштовного альтернативного програмного продукту для науково-дослідницьких цілей залишається актуальною.

На основі зазначених висновків визначаються основні завдання для розробки моделі:

1. Аналіз існуючих методів підвищення ефективності автономних систем електроживлення
2. Розробка моделі сонячних панелей для аналізу та моделювання її показників у різних умовах.
3. Розробка функціональної схеми оптимізатора сонячної батареї.
4. Розробка методу аналізу роботи сонячної панелі з використанням даних зовнішніх датчиків.
5. Розробка моделі для імітаційного моделювання високоефективної автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо.

## 2 МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ДИЗПАЛИВО ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ПАРАМЕТРІВ

### 2.1 Формальна модель автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

Розглянемо узагальнену схему системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо, до складу якої входять наступні вузли:

– споживачі електричної енергії, установка переробки полімерних відходів у дизпаливо;

– зовнішня електромережа;

– сонячні панелі ;

– акумуляторні блоки;

– генератор.

В системі з кількома вузлами баланс потоків електричної енергії можна виразити за допомогою системи лінійних рівнянь, яка враховує вироблення, споживання та передачу енергії між вузлами. Узагальнена структурна схема системи електроживлення зображена на рисунку 2.1.

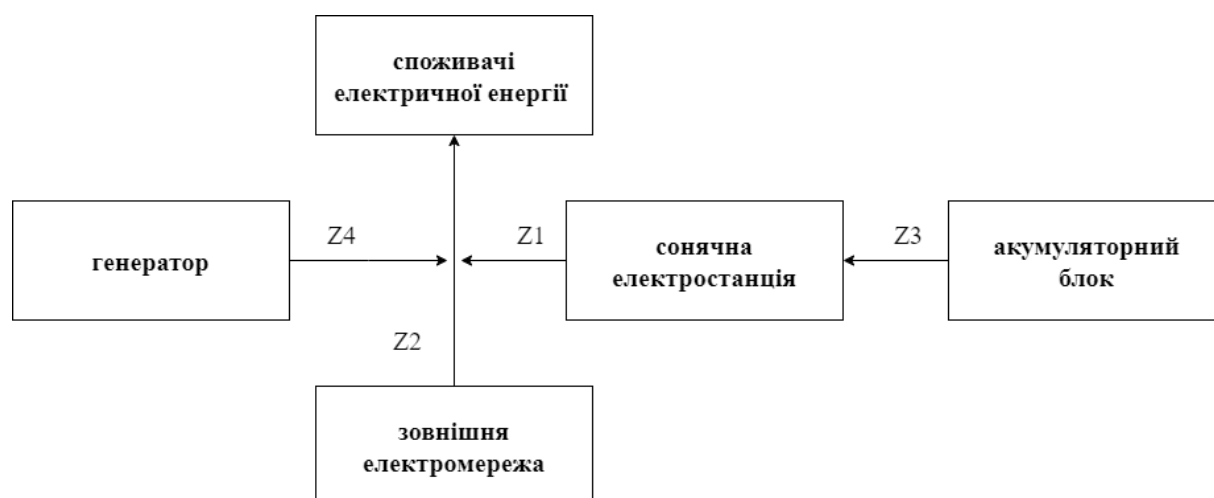


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема електроживлення із використанням сонячної електростанції та акумуляторним блоком

Загальна потужність вузлу  $i$  визначається наступною формулою:

$$P_{\text{загальна}} = P_{\text{вироблення}} - P_{\text{споживана}} \quad (2.1)$$

де  $P_{\text{вироблення}}$  - загальна потужність, вироблена на вузлі  $i$ ,  $P_{\text{споживана}}$  - споживана потужність на вузлі  $i$ .

Баланс енергії на вузлі  $i$ : визначається рівнянням (2.2)

$$P_{\text{загальна},i} = \sum_{j=1}^N P_{\text{передача},ij} \quad (2.2)$$

Користуючись рівнянням (2.2) ми можемо вивести систему рівнянь для обрахунку  $P_{\text{загальна}}$ :

$$\begin{aligned} P_{\text{загальна},1} &= \sum_{j=1}^N P_{\text{передача},1j}, \\ P_{\text{загальна},2} &= \sum_{j=1}^N P_{\text{передача},2j}, \\ &\vdots \\ P_{\text{загальна},i} &= \sum_{j=1}^N P_{\text{передача},ij}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Задача електричного балансу електросистеми може бути виражена системою рівнянь, яка враховує вироблену та спожиту потужність. У нашому випадку, з урахуванням сонячних панелей, акумуляторів та генератора, можна сформулювати таку систему рівнянь:

1. Вироблення енергії сонячними панелями: рівняння (2.4)

$$P_{\text{сонячні}} = N * P_{\text{одна панель}} \quad (2.4)$$

де  $P_{\text{сонячні}}$  - загальна потужність сонячних панелей,  $N$  - кількість сонячних панелей,  $P_{\text{одна панель}}$  - потужність однієї сонячної панелі;

2. Потужність від акумуляторів – рівняння (2.5):

$$P_{\text{аккумуляторів}} = \frac{Q}{t}, \quad (2.5)$$

де  $Q$  - заряд аккумуляторів,  $t$  - час автономної роботи системи на аккумуляторах;

3. Споживана потужність установкою: рівняння (2.6), де  $P_{\text{установка}}$  це потужність, яку вимагає установка переробки:

$$P_{\text{споживана}} = P_{\text{установка}}. \quad (2.6)$$

4. Зарядка аккумуляторів від установки: рівняння (2.7), де  $P_{\text{вироблення}}$  - загальна вироблена потужність,  $P_{\text{споживана}}$  - загальна вироблена потужність:

$$P_{\text{зарядка}} = P_{\text{вироблення}} - P_{\text{споживана}}. \quad (2.7)$$

5. Потужність від генератора:  $P_{\text{генератору}}$  - потужність генератора.

Загальна електрична потужність системи є сумою потужностей від сонячних панелей, аккумуляторів та генератора.

$$P_{\text{загальна}} = P_{\text{сонячні}} + P_{\text{аккумулятори}} + P_{\text{генератор}} - P_{\text{установки}} \quad (2.8)$$

Отже маючи формулу (2.8) ми можемо вивести систему залежностей для обрахунку потужності нашої схеми при урахуванні режимів роботи. Система повинна містити кілька ключових режимів роботи:

- робота установки переробки полімерних відходів у дизпаливо від електромережі;
- робота установки переробки полімерних відходів у дизпаливо від сонячних панелей;
- робота установки переробки полімерних відходів у дизпаливо від генератору;

- робота установки переробки полімерних відходів у дизпаливо від акумуляторів;
- робота установки переробки полімерних відходів у дизпаливо від сонячних панелей та акумуляторів;
- зарядка акумуляторів:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{електромережа}} \geq P_{\text{установка}}, \\ P_{\text{сонячні}} \geq P_{\text{установка}}, \\ P_{\text{генератор}} \geq P_{\text{установка}}, \\ P_{\text{акумулятори}} \geq P_{\text{установка}}, \\ P_{\text{сонячні}} \geq P_{\text{установка}}, \\ P_{\text{зарядка}} \geq P_{\text{установка}}. \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Показники потужностей для обрахування можна буде вставити вручну при подальших розрахунках, але на даний момент ми будемо враховувати, що система здатна працювати від лише одного з джерел живлення, тим самим роблячи для нашої системи чотири джерела живлення, три з яких не пов'язані з електромережою, роблячи нашу систему максимально автономною.

## 2.2 Фотоелектричне перетворення у системі електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

Основним принципом функціонування сонячних батарей є внутрішній фотоелектричний ефект, який дозволяє пряме перетворення сонячного випромінювання на електроенергію у напівпровідникових матеріалах. Суть цього явища полягає в тому, що фотони світла можуть викидати електрони з поверхні тіл (зовнішній фотоелектричний ефект) або лише з кристалічної решітки всередині напівпровідника (внутрішній фотоелектричний ефект). Додатково, виникає електрорушійна сила на межі метал-напівпровідник, що викликає зміни в струмі в зовнішньому колі (вентильний фотоелектричний ефект).[9]

Це явище було відкрите німецьким фізиком Герцем у 1887 році і детально досліджене російським фізиком Столетовим у 1888 році. Фотоефект визначає основні принципи роботи сучасних сонячних батарей, надаючи можливість перетворення сонячного випромінювання на корисну електроенергію.

На сьогоднішній день, у галузі альтернативної енергетики, широкого застосування набули напівпровідникові пристрої з р-п-переходом, відомі як сонячні елементи або фотоелементи. Справжнім проривом у цій області є використання таких пристроїв, де під впливом сонячного випромінювання відбувається перерозподіл зарядів, що призводить до виникнення електрорушійної сили. Значна більшість сонячних елементів виробляється з використанням кремнію, що підкреслює важливість цього матеріалу у виробництві. [10]

Ці напівпровідникові пристрої не лише забезпечують надійне перетворення сонячного випромінювання в електроенергію, але й стають важливим компонентом сучасної енергетичної інфраструктури, сприяючи зменшенню залежності від традиційних джерел енергії. Враховуючи їх високу ефективність та стійкість, сонячні елементи стають необхідним елементом стратегії сталого розвитку та збереження навколишнього середовища.

Сонячний елемент складається із двох пластин напівпровідника, n- і p- типу, які в свою чергу і утворюють р-п-перехід. Конструкція сонячного елемента схематично зображена на рисунку 2.2.

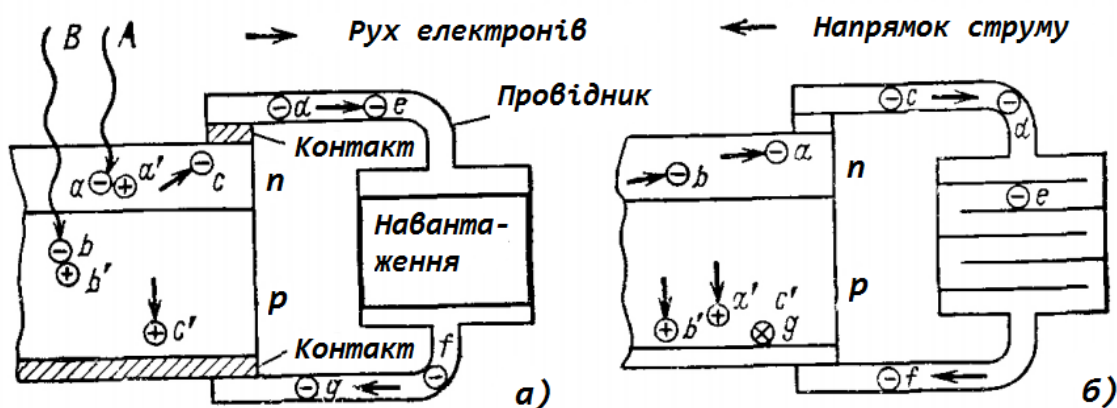


Рисунок 2.2 – Принцип генерування електричного струму сонячним елементом

При наявності сонячного випромінювання сонячні елементи активно поглинають фотони з різною енергією на різних глибинах. Відбувається процес викидання електронів з атомів напівпровідника фотонами А та В, що породжує дві електронно-діркові пари  $aa'$  та  $bb'$ . Під впливом створених електричних полів р-n-переходу, електрони та дірки рухаються в матеріалі. Наприклад, електрон  $s$  і дірка  $s'$ , викликані фотоном, просуваються в напрямку n- та р-областей відповідно. Подальший рух електронів з n-області через зовнішнє навантаження до р-області (означених як d, e, f та g) породжує електричний струм. [11] На межі контакту із р-областю електрони рекомбінуються із дірками, стаючи тим самим нейтральними, поки наступний фотон не створить нову електронно-діркову пару. Цей процес утворення електричного струму відображає складний механізм, який лежить в основі функціонування сонячних елементів, забезпечуючи ефективне перетворення сонячного випромінювання в електроенергію.

Для визначення нелінійних характеристик фотоелементів було розроблено різноманітні математичні моделі. [12] Ці моделі варіюються за кількістю невідомих параметрів, які необхідно визначити. Серед найбільш популярних математичних моделей фотоелементів можна виділити наступні:

1. Явна модель: Ця модель визначається виразами, які явно описують залежність між вхідними та вихідними параметрами фотоелемента.

2. Модель із 4-ма параметрами: У цій моделі використовуються чотири параметри для опису характеристик фотоелемента. Це може бути, наприклад, струм короткого замикання, напруга відкриття, фактор форми тощо.

3. Модель із 5-ма параметрами: Розширена версія попередньої моделі, яка включає додатковий параметр для більш точного опису нелінійних властивостей фотоелемента.

4. Модель із двома діодами: Ця модель використовує два діоди для апроксимації характеристик фотоелемента. Вона дозволяє більш точно враховувати взаємодію різних діодів у структурі фотоелемента.

Враховуючи різноманіття доступних моделей, важливо вибрати ту, яка найкраще відповідає конкретним умовам та завданням дослідження. Кожна з цих

математичних моделей має свої переваги та обмеження, і вибір моделі залежить від конкретного застосування та точності, яку необхідно досягти.

Ідеальний сонячний елемент може бути представлений еквівалентною електричною схемою, що складається із діода та джерела струму, рисунок 2.3.

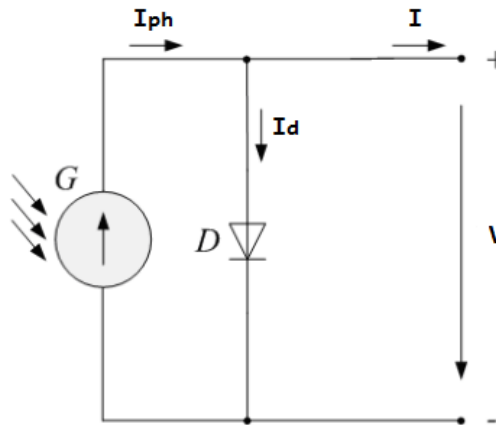


Рисунок 2.3 – Еквівалентна схема ідеального сонячного елементу

Джерело струму фотоелемента визначається фотострумом, що виникає внаслідок створення світлом неосновних зарядів. У такому випадку, вольт-амперна характеристика (ВАХ) сонячного елементу (СЕ) залежить від фотоструму та струму, який протікає через ідеалізований р-п-перехід при заданій температурі  $T$  і напрузі на виході  $V$ , і вона визначається наступним рівнянням:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (2.10)$$

$I$  – загальний струм сонячного елементу;

$I_{ph}$  – фотострум, А;

$I_0$  – зворотній струм насичення;

$T$  – температура СЕ, К;

$V$  – напруга на виході сонячного елементу;

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  – заряд електрона, Кл;

$n$  – ідеальний фактор чутливості;

$k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  – постійна Больцмана, Дж/К.

Це рівняння враховує вплив фотоструму і зворотного температурного струму на загальний струм фотоелемента. Воно є ключовим для розуміння електричної характеристики сонячних елементів та їхньої відповіді на різні умови експлуатації. [13]

### 2.3 Цифровий двійник фотоелектричної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

Діджиталізація і використання цифрових двійників, як віртуальних реплік фізичних активів та процесів, представляють собою визначену перевагу для галузей, спрямованих на оптимізацію та підвищення ефективності своєї діяльності. В галузі сонячної енергетики, ця технологія є потужним інструментом для підвищення продуктивності сонячних установок, зниження витрат та сприяння переходу до сталого енергетичного майбутнього.

Хоча концепція цифрових близнюків не нова, її застосування в секторі сонячної енергетики лише розкриває свій потенціал. Зростаючий попит на чисту енергію та необхідність вдосконалення виробництва сонячної енергії призводять до зростаючого зацікавлення у використанні цифрових близнюків для оптимізації цього процесу. Створюючи віртуальне відображення сонячної електростанції, оператори можуть в режимі реального часу контролювати, аналізувати та оптимізувати продуктивність своїх активів, що призводить до збільшення ефективності та зменшення витрат.

Однією з ключових переваг цифрових близнюків у виробництві сонячної енергії є їхня здатність надавати повний обсяг інформації про роботу сонячної станції в режимі реального часу. Це дозволяє операторам виявляти та вирішувати проблеми до їх ескалації, мінімізуючи час простою та забезпечуючи максимальну ефективність установки. Наприклад, цифрові двійники можуть розпізнавати аномалії в роботі сонячних панелей, такі як втрата потужності через накопичення пилу або затінення, та автоматично вживати заходів для їх вирішення.

Застосування цифрових близнюків також виявляється важливим для оптимізації дизайну та планування сонячних електростанцій. Моделюючи різноманітні конфігурації та оцінюючи вплив на кількість виробленої енергії, оператори можуть визначати ефективне розташування сонячних панелей, максимізуючи продуктивність установки. Це може бути особливо корисним на етапах планування нового проекту сонячної електростанції, оскільки дозволяє розробникам оптимізувати конструкцію з самого початку, зменшуючи потребу в дорогих модифікаціях у подальшому.

Іншою областю, де цифрові близнюки можуть бути вельми цінними, є прогнозування технічного обслуговування. Завдяки постійному моніторингу ефективності компонентів сонячної електростанції, цифрові близнюки можуть виявляти закономірності та тенденції, які можуть свідчити про потенційні проблеми або збої. Це дозволяє операторам планувати технічне обслуговування заздалегідь, зменшуючи ймовірність несподіваних простоїв і гарантуючи оптимальну ефективність установки.

Крім того, цифрові двійники можуть відігравати ключову роль у підвищенні точності прогнозування сонячної енергії. Інтегруючи дані в реальному часі про погодні умови, сонячне випромінювання та інші фактори, цифрові близнюки можуть допомагати операторам передбачати кількість енергії, яку буде генерувати станція в найближчі години та дні. Це може стати важливим елементом для операторів мереж, яким необхідно збалансувати попит і пропозицію для забезпечення стабільності енергосистеми.

Крім вищезначених переваг, цифрові близнюки також можуть сприяти обміну знаннями та співпраці між різними учасниками сектору сонячної енергетики. Надаючи спільну платформу для аналізу даних та прийняття рішень, цифрові близнюки можуть допомагати вирішувати проблеми спільно, подолати розриви між різними командами та відділами, сприяючи створенню більш ефективного та динамічного робочого середовища для співпраці.

Для моделювання цифрового двійника фотоелектричної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо за

середовище моделювання було обрано Matlab Simulink, приклад проекту у якому зображено на рисунку 2.4.

Вибір Matlab Simulink може бути обумовлений кількома факторами:

1. Зручність використання: Matlab Simulink - це потужний інструмент для моделювання динамічних систем, який має інтуїтивний інтерфейс та велику кількість готових блоків для побудови складних моделей. Його графічний інтерфейс полегшує визначення взаємодії між різними компонентами системи;

2. Можливості моделювання електроживлення: Matlab Simulink пропонує широкий набір інструментів для моделювання електромеханічних, термічних та інших систем, що може бути важливим для деталізованого вивчення фотоелектричних систем та їхньої електроживлення в контексті установки переробки відходів;

3. Величезна спільнота користувачів та підтримка: Matlab має велику спільноту користувачів і велику кількість матеріалів, документації та онлайн-ресурсів для допомоги в розв'язанні проблем та вивченні можливостей Simulink;

4. Інтеграція з іншими інструментами: Matlab може легко інтегруватися з іншими інструментами та мовами програмування, що може бути корисним для подальшого розвитку та оптимізації системи.

5. Розширені можливості аналізу та візуалізації результатів: Matlab Simulink надає широкі можливості для аналізу та візуалізації результатів моделювання, що може сприяти кращому розумінню та оптимізації фотоелектричних систем та їхнього електроживлення.

Для отримання даних від датчиків було обрано комунікаційний протокол Modbus. Протокол Modbus забезпечує внутрішній стандарт, який контролери використовують для розбору повідомлень. Під час обміну даними в мережі Modbus, протокол визначає, як кожен контролер дізнається адресу свого пристрою, розпізнає адресоване адресоване йому, визначатиме вид дії, яку потрібно виконати, та витягуватиме будь-які дані або іншу інформацію, що міститься в повідомленні. Якщо потрібна відповідь, контролер створить повідомлення-відповідь і надішле його, використовуючи протокол Modbus.

В інших мережах повідомлення, що містять протокол Modbus, вбудовуються у структуру кадрів або пакетів, яка використовується в мережі. Наприклад, мережеві контролери Modicon мережеві контролери для Modbus Plus або MAP, з відповідним прикладним програмним забезпеченням бібліотеками та драйверами, забезпечують перетворення між вбудованим повідомленням протоколу Modbus протоколом Modbus і спеціальними протоколами кадрів, які ці мережі використовують для зв'язку між вузловими пристроями.

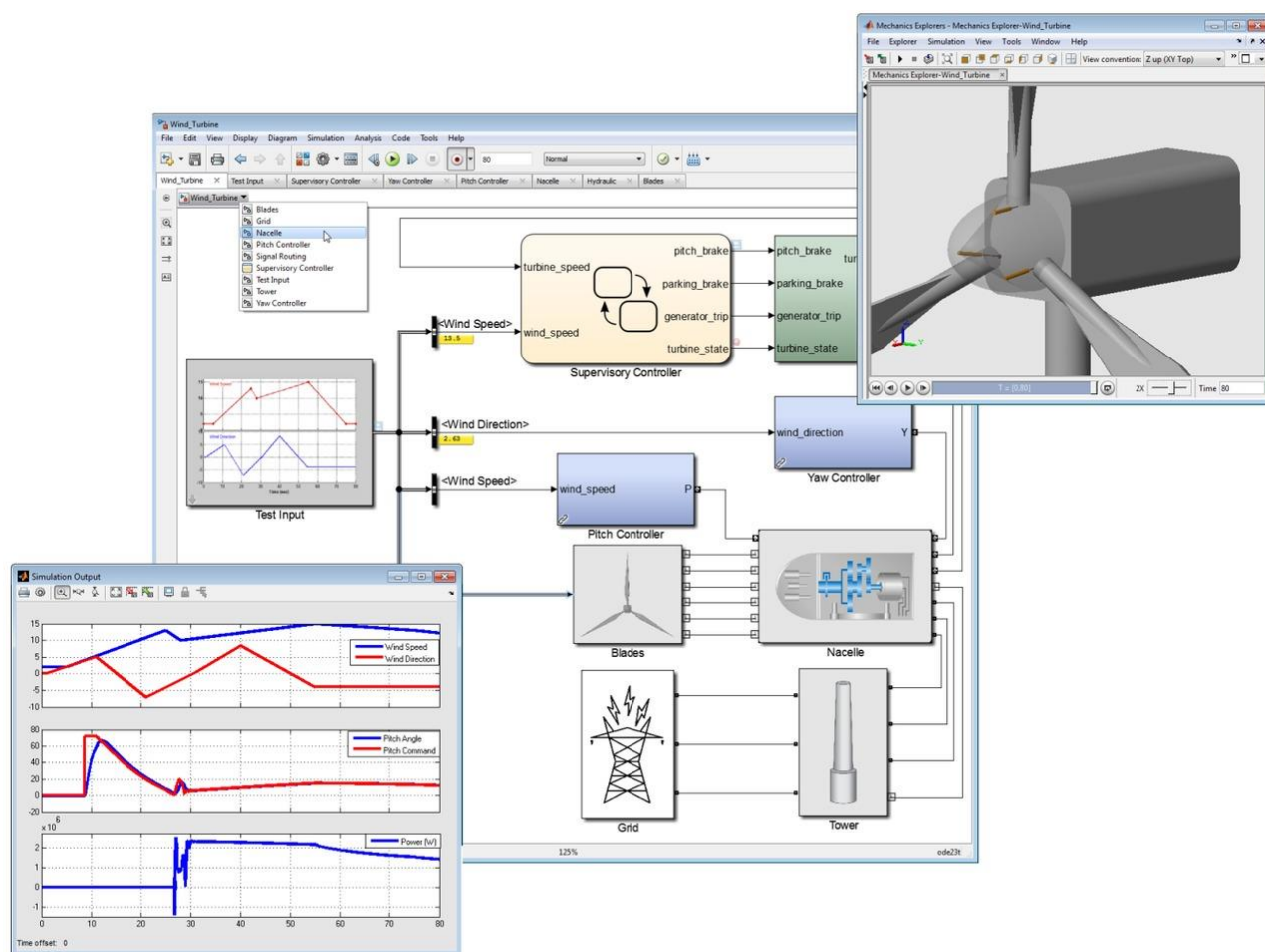


Рисунок 2.4 – Приклад проекту реалізованого у Matlab Simulink

Це перетворення також поширюється на визначення адрес вузлів, шляхів маршрутизації та методів перевірки помилок, специфічних для кожного типу мережі. Наприклад, Modbus адреси пристроїв, рисунок 2.5, що містяться у протоколі Modbus, будуть перетворені на адреси вузлів адреси пристроїв, що

містяться у протоколі Modbus, будуть перетворені на адреси вузлів перед передачею повідомлень. Поля для перевірки помилок також будуть застосовуються до пакетів повідомлень, відповідно до протоколу кожної мережі. У кінцевій точці доставки, наприклад, на контролері, вміст вбудованого повідомлення, записаного за допомогою протоколу Modbus, визначає дії, які необхідно виконати.

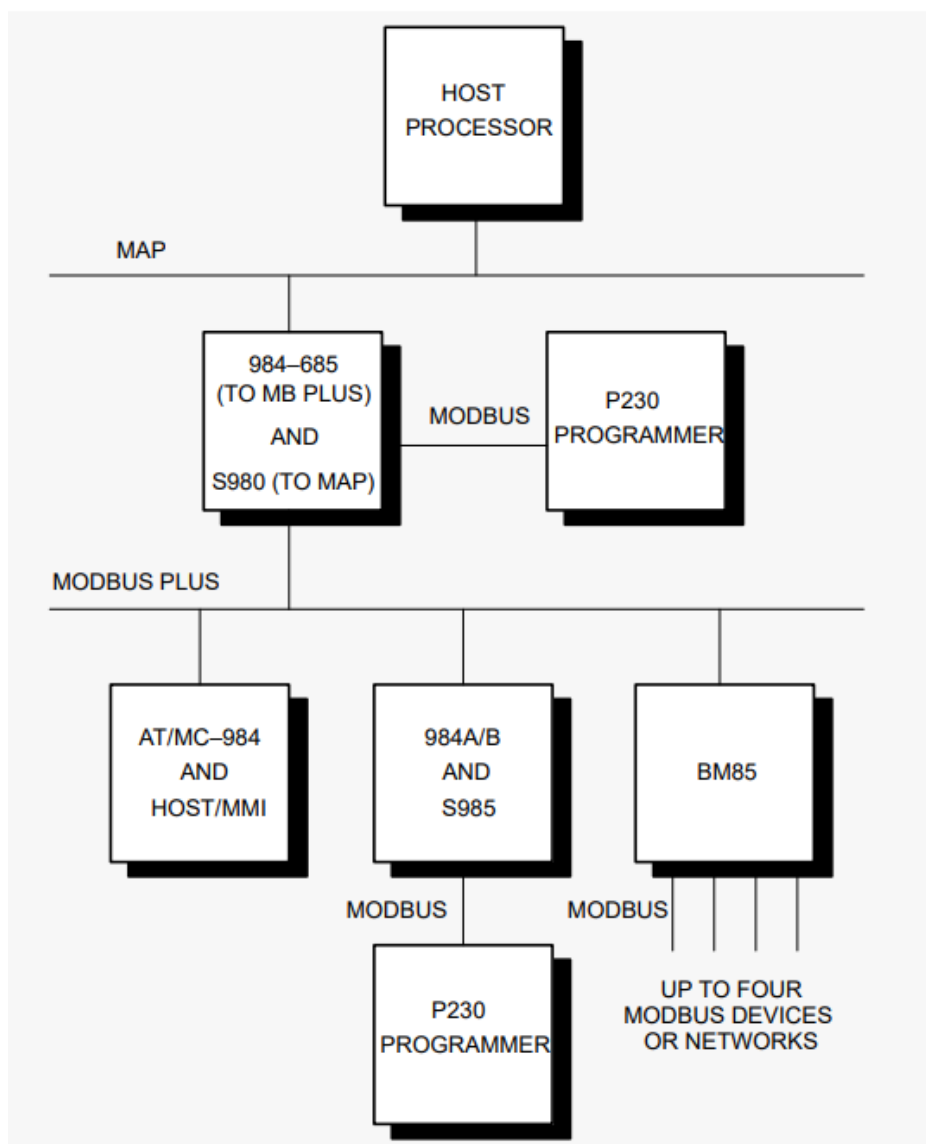


Рисунок 2.5 – Огляд застосування протоколу Modbus

Matlab Simulink має підтримку Modbus протоколу, рисунок 2.6 та рисунок 2.7, і здатне працювати із ним у режимі реального часу, що максимально підходить для моделювання процесів та контролю системи, також Modbus часто використовується у роботі з програмованими логічними контролерами, що

дозволить в майбутньому покращити систему керування для роботи із програмованими логічними контролерами без зміни протоколу передачі даних.

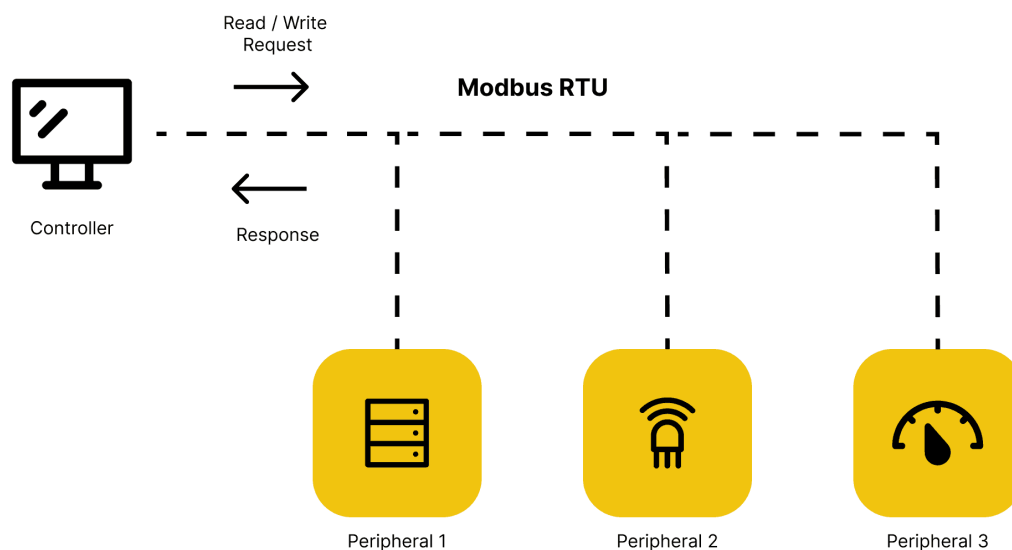


Рисунок 2.6 – Принцип роботи Modbus протоколу

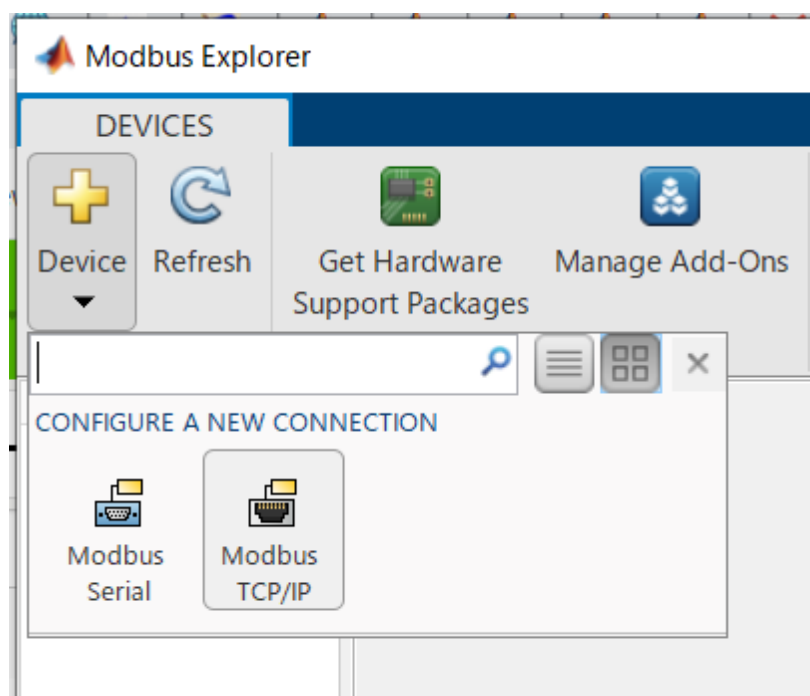


Рисунок 2.7 - Modbus Explorer у Simulink

Modbus Simulink є доволі непопулярною темою для досліджень, оскільки більшість користувачів та робіт виконаних в Matlab використовують заготовлені масиви даних або отримують їх внаслідок моделювання систем у Simulink, тому сам процес інтегрування даних отриманих в режимі реального часу є своєрідним плюсом для моделі. На рисунку 2.8 та 2.9 представлено приклад реалізації обміну даних між датчиками та моделлю.

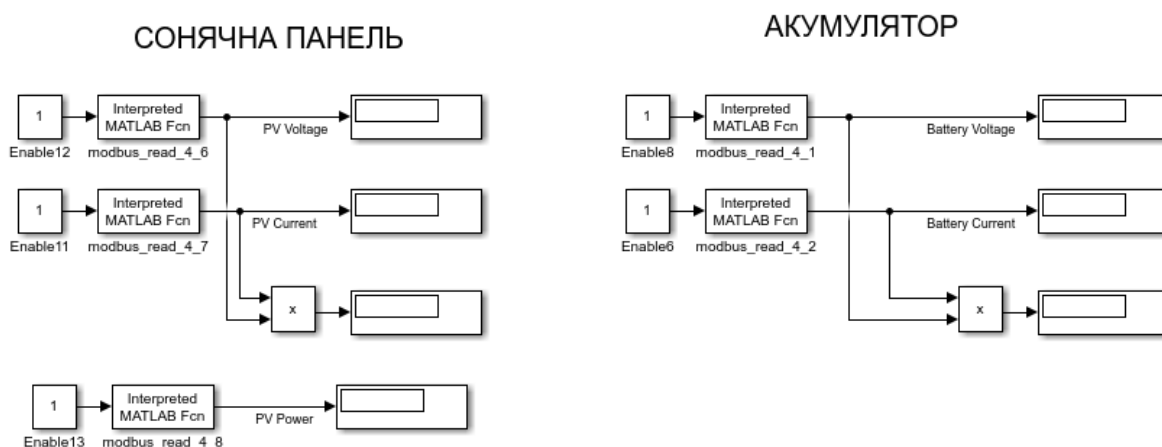


Рисунок 2.8 – Реалізація зчитування сигналу Modbus у Simulink

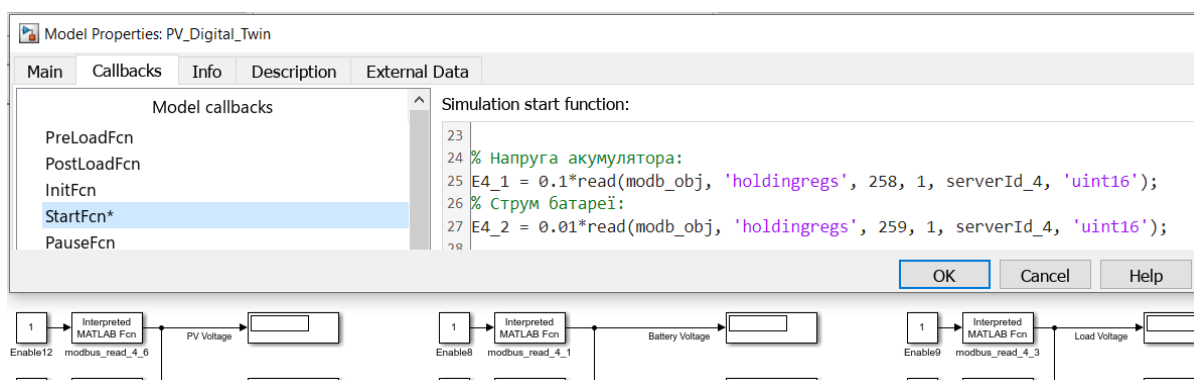


Рисунок 2.9 – Ініціалізація зчитування сигналу Modbus у Simulink

Як видно з рисунку 2.8, система передає данні від інвертору-контролеру заряду за допомогою роз'єму rs 485 який під'єднаний до комп'ютеру за допомогою Modbus USB конвертору. Інвертору-контролеру заряду дозволяє зчитати данні які він обраховує та виводить на екран, до таких даних належать показники сонячних панелей, а саме напруга, сила струму та потужність, також якщо до системи

підключені додаткові модулі, у нашому випадку це буде система акумуляторів, генератор та зовнішнє живлення можна отримати данні усіх елементів. Також завдяки розумному інвертору-контролеру заряду ми маємо можливість змінювати режими роботи передаючи зворотній сигнал, що дозволить нам переходити із режиму живлення від сонячних панелей та акумулятору до режиму зарядки акумулятору, а також дозволить відстежувати його стан.

При запуску моделі в підменю StartFcn\* вводиться код, який запускається при початку моделювання системи, у цьому простому коді прописуються параметри для зчитування або запису інформації, такі як роз'єм, id, server\_id, швидкість зчитування / запису якщо вона відрізняється від стандартних 9600 біт/с, а також обирається які дії виконувати з регістром.

#### Висновки до другого розділу

В ході проведення досліджень, ми ретельно розглянули проблеми, пов'язані з використанням сонячної енергії, а також дослідили моделювання фотоелектричних систем електроживлення для переробки полімерних відходів у дизпаливо. Основні аспекти роботи включають аналіз принципів функціонування сонячних елементів та їх взаємодії з сонячним випромінюванням, а також процес перетворення світлової енергії в електричний струм. Для подальшого дослідження та моделювання фотоелектричних систем були використані різноманітні математичні моделі, які включають явні моделі та моделі з використанням 4-5 параметрів. Ці моделі дозволяють враховувати нелінійні властивості фотоелементів та оптимізувати їхню продуктивність.

У зв'язку з цифровим двійником та його застосуванням у галузі сонячної енергетики, були виділені переваги цієї технології. Цифрові близнюки надають можливість оптимізувати виробництво сонячної енергії, знижуючи витрати та забезпечуючи стійку та ефективну роботу сонячних установок.

Для виконання зв'язку системи та моделі було обрано протокол Modbus для отримання даних від датчиків та обміну інформацією в мережі. Протокол Modbus

визначає стандарт обміну даними та забезпечує ефективну адресацію та виконання дій в системі.

Середовище моделювання фотоелектричних систем обрано в Matlab Simulink з урахуванням його зручності використання, можливостей моделювання та підтримки проектів.

Інтеграція цифрових технологій, використання математичних моделей та ефективних комунікаційних протоколів дозволяє оптимізувати виробництво сонячної енергії, забезпечуючи стабільну та продуктивну роботу фотоелементів та систем у цілому.

## 3 АЛГОРИТМИ ТА ТЕХНОЛОГІЯЇ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ДИЗПАЛИВО

### 3.1 Алгоритм розрахунку системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

Етапи алгоритму розрахунку системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо виглядатимуть наступним чином:

1. Збір вихідних даних: визначення всіх електричних пристроїв і обладнання, які будуть підключені до системи. У нашій системі можна виділити п'ять основних груп: живлення яке споживає установка переробки полімерних відходів у дизпаливо; живлення надане зовнішньою мережею; живлення генератору; живлення системи сонячних панелей; акумулятори;

2. Оцінка споживаної потужності: розрахунок загальної потужності, яку вимагає система від усіх підключених пристроїв. Для установки переробки полімерних відходів у дизпаливо слід враховувати максимальну необхідну потужність для підтримування роботи, при використанні акумуляторів слід також враховувати принцип роботи системи і якщо система допускає одночасну зарядку акумуляторів та роботу установки переробки полімерних відходів у дизпаливо додати потужності, також слід урахування можливість поправок при пікових навантажень;

3. Вибір джерела живлення: установка переробки полімерних відходів у дизпаливо буде живитися за рахунок чотирьох потенційних джерел живлення: шість сонячних панелей, група акумуляторів, генератор, зовнішня система електроживлення;

4. Резервування: для успішної та економної роботи системи передбачено резервування живлення у вигляді різних, не пов'язаних між собою джерел живлення.

Наступні етапи розробки алгоритму розрахунку системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо можна відкласти до початку наступних стадій реалізації проекту, а на даному етапі не враховувати, оскільки для моделювання такі параметри як матеріал проводів їх довжина, схеми заземлення та документація не відіграють значної ролі в розрахунках.

Модель повинна розрахувати наступні параметри:

- точка максимальної потужності сонячних панелей;
- потужності які може видавати генератор;
- стан акумуляторів;
- розрахунок необхідної потужності для роботи установки переробки полімерних відходів у дизпаливо використовуючи доступні джерела.

Вхідними даними для розрахунку потужності сонячних панелі є :

- параметри сонячної панелі вказані виробником;
- параметри акумулятора вказані виробником;
- параметри генератора вказані виробником;
- показники освітлення та температури;
- показники контролера заряду.








 <b>Risen Energy Co.,Ltd.</b> Model Type: RSM120-8-690BMDG STC: AM1.5 E=1000W/m <sup>2</sup> Tc=25°C Power Sorting: 0-4.99W Bifaciality: 70%		Rated Maximum Power(Pmax)	590W	Maximum System Voltage	DC1500V
		Voltage at Pmax	34.42V	Dimensions	2172*1303*35mm
		Current at Pmax	17.16A	Weight	35kg
		Open-Circuit Voltage(Voc)	41.30V	Safety class	Class II
		Short-Circuit Current(Isc)	18.16A	Maximum overcurrent protect rating	35A
		Open Circuit Voltage tolerance	±3%	 <b>WARNING</b> DO not disconnect under load. Power production tolerance ±3%, Bifaciality tolerance±5%. This module produces electricity when exposed to light.	
		Short Circuit Current tolerance	±4%	     	
Website:www.risenenergy.com E-mail:info@risenenergy.com		I3			
Add:Meilin,Ninghai,Ningbo,Zhejiang 315609,P.R.China.		M-G5.6			
Tested according to IEC61215:2016 and IEC61730-1/2:2016 Made in China					

Рисунок 3.1 – параметри сонячної панелі вказані виробником

Для розрахунку будемо використовувати стандартний елемент Matlab Simulink PV array, який використовує стандартні дані сонячної панелі зображені на рисунку 3.1[14] для симуляції вихідних параметрів. Блок PV Array реалізує масив фотоелектричних (PV) модулів. Масив будується з ланцюжків модулів,

з'єднаних паралельно, кожен ланцюжок складається з модулів, з'єднаних послідовно. Цей блок дозволяє моделювати попередньо встановлені фотоелектричні модулі з моделі System Advisor National Renewable Energy Laboratory, а також фотоелектричні модулі, які задаються самостійно. Вольт-амперні характеристики діода для одного модуля визначаються виразами (3.1) та (3.2). Де:

$I_d$  - Струм діода (А);

$V_d$  - Напруга діода (В);

$I_0$  - Струм насичення діода (А);

$nI$  - Коефіцієнт ідеальності діода, число, близьке до 1.0;

$k$  - Постійна Больцмана =  $1.3806e-23$  Дж.К-1;

$q$  - Заряд електрона =  $1.6022e-19$  С;

$T$  - Температура комірки (К);

$N_{cell}$  - Кількість послідовно з'єднаних комірок у модулі;

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} * nI * N_{cell} \quad (3.2)$$

Подібним типом розглядаються типові сонячний елементи, вольт амперні характеристики якого можна описати еквівалентною схемою, що складається з одного ідеального переходу експоненціального типу, джерела постійного фотогенерованого струму, послідовного паразитного опору і паралельної паразитної провідності. [15, 16] На рисунку 3.2 представлено еквівалентну схему такої моделі. Математичний опис цієї схеми дається наступним рівнянням:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V - IR_S}{nV_{th}}\right) - 1 \right] + (V - IR_S)G_P - I_{ph} \quad (3.3)$$

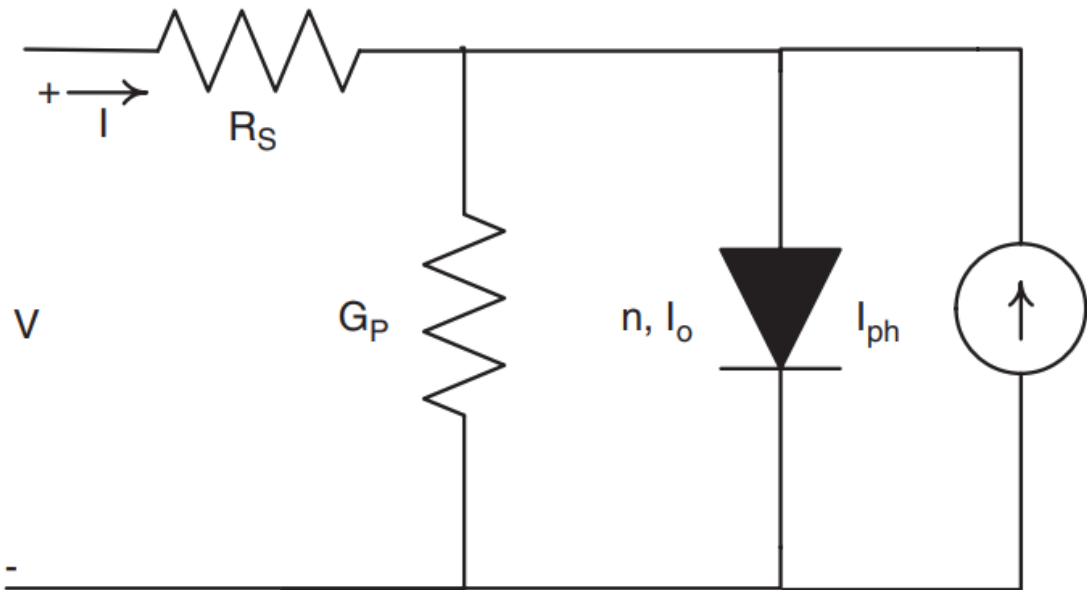


Рисунок 3.2 – еквівалентна схема моделі

Де  $I$  - струм терміналу,  $V$  - напруга терміналу,  $I_0$  - зворотний струм насичення струм зворотного насичення,  $n$  - коефіцієнт ідеальності,  $I_{ph}$  – фото-генерований струм і  $V_{th} = k \cdot T / q$  - теплова напруга.

Добре відомо, що наведене вище неявне трансцендентне рівняння не може бути розв'язане явно в загальному випадку для  $I$  або  $V$  за допомогою звичайних елементарних функцій. Тому було прийнято використовувати явні наближені розв'язки для цілей моделювання. Декілька таких наближених розв'язків було запропоновано, які використовують лише елементарні функції. [17]

Розрахунок віддачі генератору не буде проводитися а за його вихідну потужність буде встановлено вихідну потужність згідно документації на генератор для моделювання при певних режимах роботи системи. Система акумуляторів буде повністю контролюватися за допомогою інвертора – контролера заряду, який при необхідності зможе покривати частину необхідної потужності із зовнішньої мережі.

### 3.2 Розробка моделі системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо в середовищі Simulink

Модель сонячної панелі, була реалізована в середовищі MATLAB Simulink, спеціалізованому середовищі для імітаційного моделювання. [18]

Параметри панелі у блоці PV Array задані вручну на рисунку 3.3.

Схема для моделювання вольт-амперної та вольт-ватної характеристики сонячної панелі використовуючи з датчиків зображена на рисунку 3.4.

Block Parameters: Сонячний модуль

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module:

Maximum Power (W)

Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V)

Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V)

Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Рисунок 3.3 – параметри сонячної панелі у блоці PV Array



Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму роботи

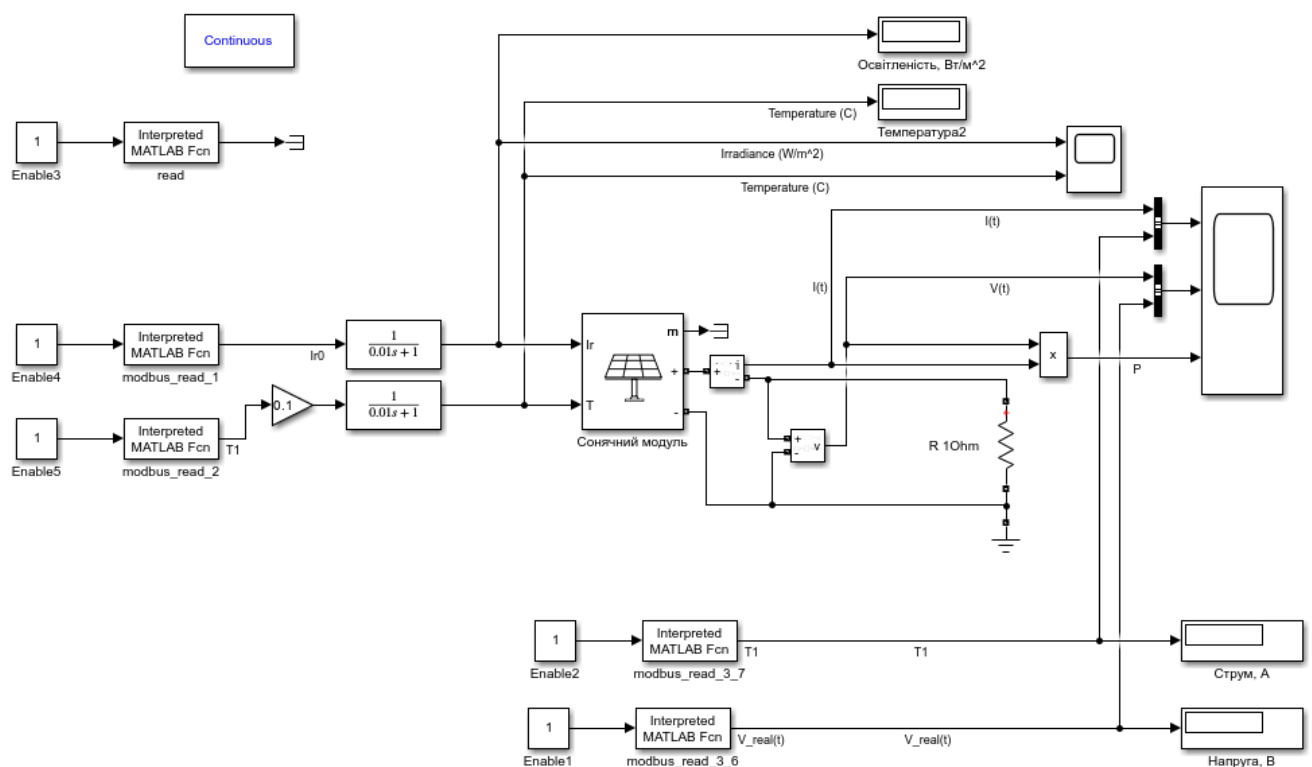


Рисунок 3.5 – Модель для зняття ВАХ сонячної панелі

Побудована модель для зняття ВАХ сонячної панелі в реальному часі при заданих параметрах температури та освітлення зображено на рисунку 3.5. [19] Модель отримує через Modbus данні освітлення та температури напряму з датчиків, `modbus_read_1` та `modbus_read_2`, оба елемента мають швидкість зчитування 9600, відмічені як `id1` та `id2` відповідно. Зовнішній опір виставлено на 1 Ом, при використанні бажано виміряти зовнішній опір напряму, або маючи показники моделі переконатися в відповідності потужностей моделі та реальної панелі, якщо показники потужності співпадають то ввести поправки опору. Решту даних модель отримує від гібридного інвертору POW-HVM3.2H-24V, інвертор має роз'єм rs485 який передає данні по modbus, а саме – реальні показники навантаження та напруги, для порівняння з моделлю. [20]

$$I = I_{ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{V - IR_S}{mV_t}\right) - 1 \right] + \frac{(V - IR_S)}{R_{Sh}} \quad (3.4)$$

Структура підсистеми PV Array, побудована на основі аналітичного виразу (3.4) для ВАХ масиву і має наступний вигляд; представлена на рисунку 3.6. Вона також включає в себе підсистеми для моделювання струмів.

Кероване джерело струму визначає вихідний струм для електричних виходів. Вектор  $m$ , що визначає вихід, складається зі значень струму та напруги, що виходять з сонячної панелі. Ці значення струму ( $I_d$ ) та поточні значення температури ( $T$ ) та інсоляції ( $G$ ) також враховуються у вихідному векторі. [21]

На рисунку 3.7 зображена внутрішня структура підсистеми, що моделює струм. Вхідними даними для неї виступають температура  $T$  та інтенсивність сонячного випромінювання  $G$ , в певних версіях Matlab Simulink може відмічатися як  $k$ , та мати іншу будову.

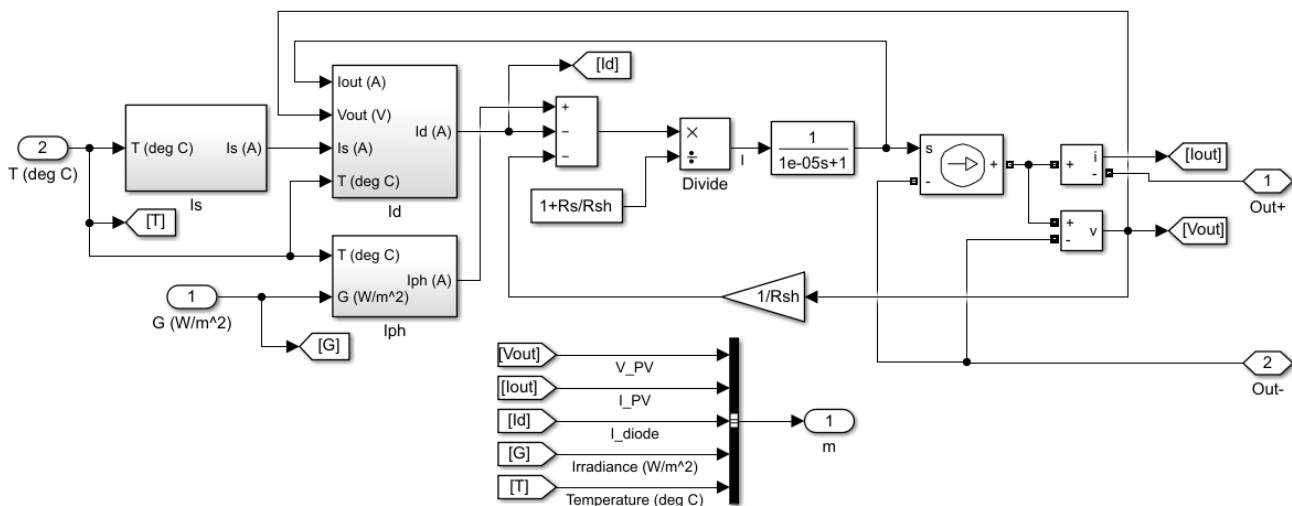


Рисунок 3.6 – Внутрішня структура PV Array

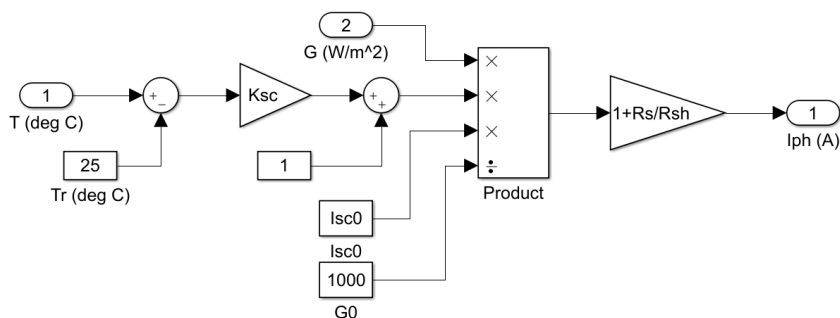


Рисунок 3.7 – Структура підсистеми Iph

На рисунку 3.8 представлено структура підсистеми, яка моделює струм насичення. Ця структура враховує температурну залежність струму із використанням температурних коефіцієнтів. В якості вхідних даних для цієї підсистеми використовується температура поверхні сонячної панелі. [22]

На рисунку 3.9 відображена підсистема, яка моделює струм діоду. Підсистема отримує на вхід, крім температури та струму, також значення струму та напруги на виході сонячної панелі.

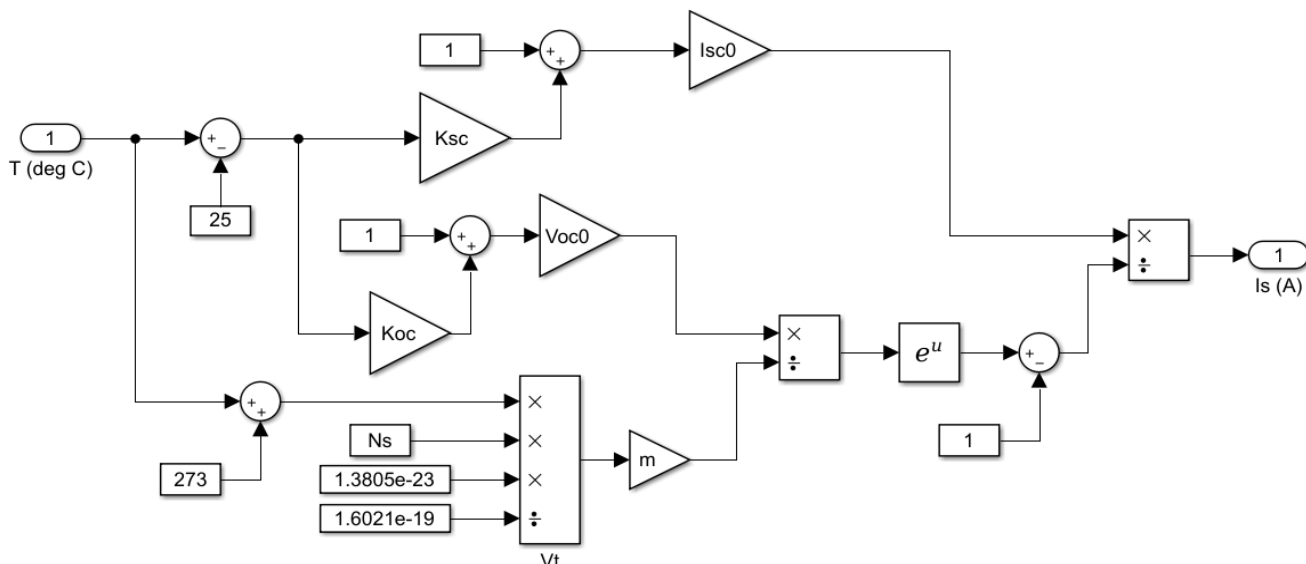


Рисунок 3.8 – Структура підсистеми Is

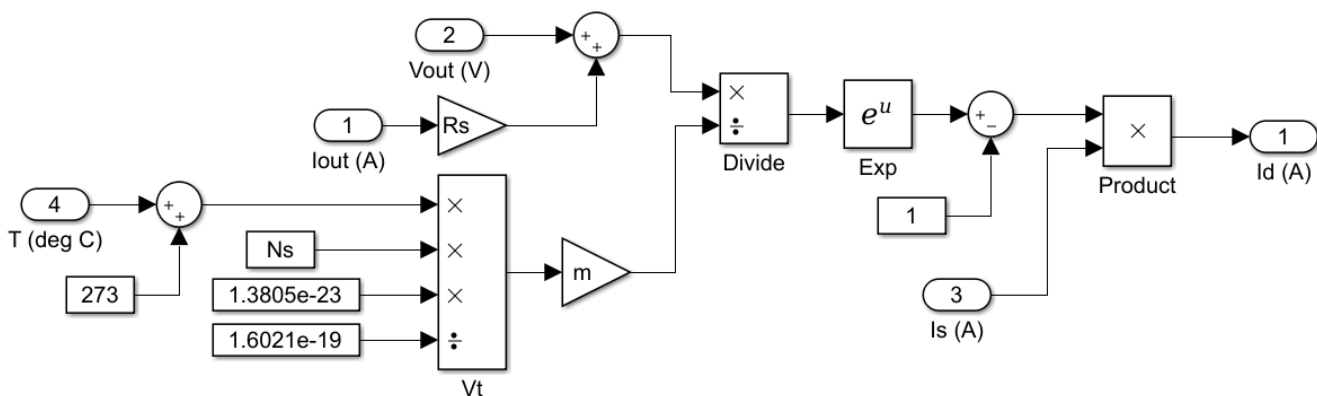


Рисунок 3.9 – Структура підсистеми Id

Для перевірки правильності побудованої моделі було виконано порівняння отриманих в результаті моделювання даних із експериментальними даними, які були отримані нами за допомогою сонячних панелей RSM120-8-590BMDG. Показники були отримані у сонячний день з використанням датчика освітлення та температури, для зміни показника освітлення було проведено ряд зміни кута положення сонячної панелі, завдяки чому було отримано різні показники, та що в свою чергу вплинуло на температуру панелі. У цьому дослідженні було отримано п'ять наборів даних для напруги і струму. Графіки із порівнянням результатів моделювання із експериментальними даними зображені на рисунках наведених

нище, так на рисунку 3.10 та рисунку 3.11 зображено порівняння при показнику освітлення – 550 і температурі 35 та освітленні 850 і температурі 40 відповідно, а на рисунку 3.12 наведено графік даними для усіх з наборів даних.

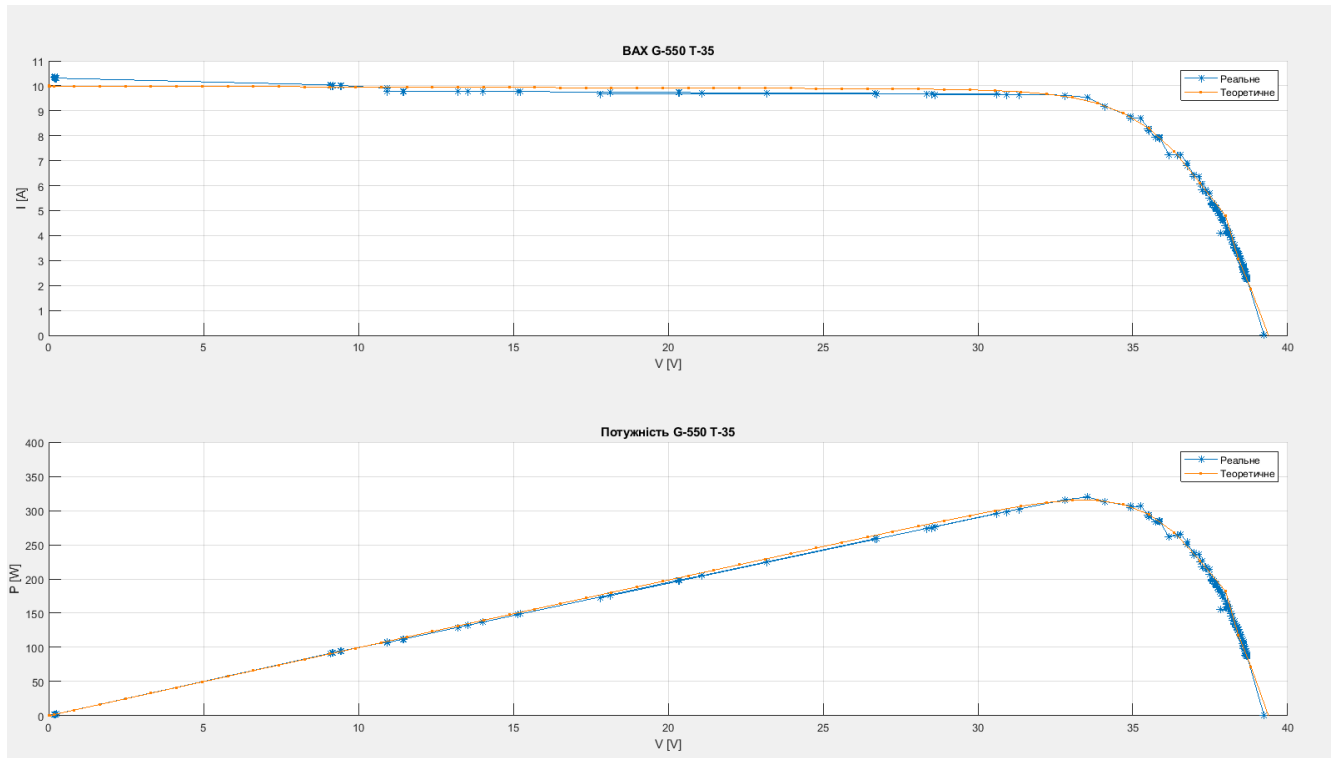


Рисунок 3.10 – Порівняння результатів моделювання сонячної панелі з реальними даними експерименту при G-550 T-35

Розроблена імітаційна модель дозволяє створювати вольт-амперні характеристики (ВАХ) сонячних панелей залежно від рівня інтенсивності сонячного випромінювання і температури. Використовуючи цю модель, можна здійснити апроксимацію реального фотоелектричного модуля з певним ступенем точності в межах допустимих похибок. Модель дозволяє досліджувати, як змінюються характеристики сонячних панелей в різних умовах освітленості та температури, що допомагає у вирішенні питань щодо їхньої ефективності та робочої продуктивності в різних сценаріях використання.

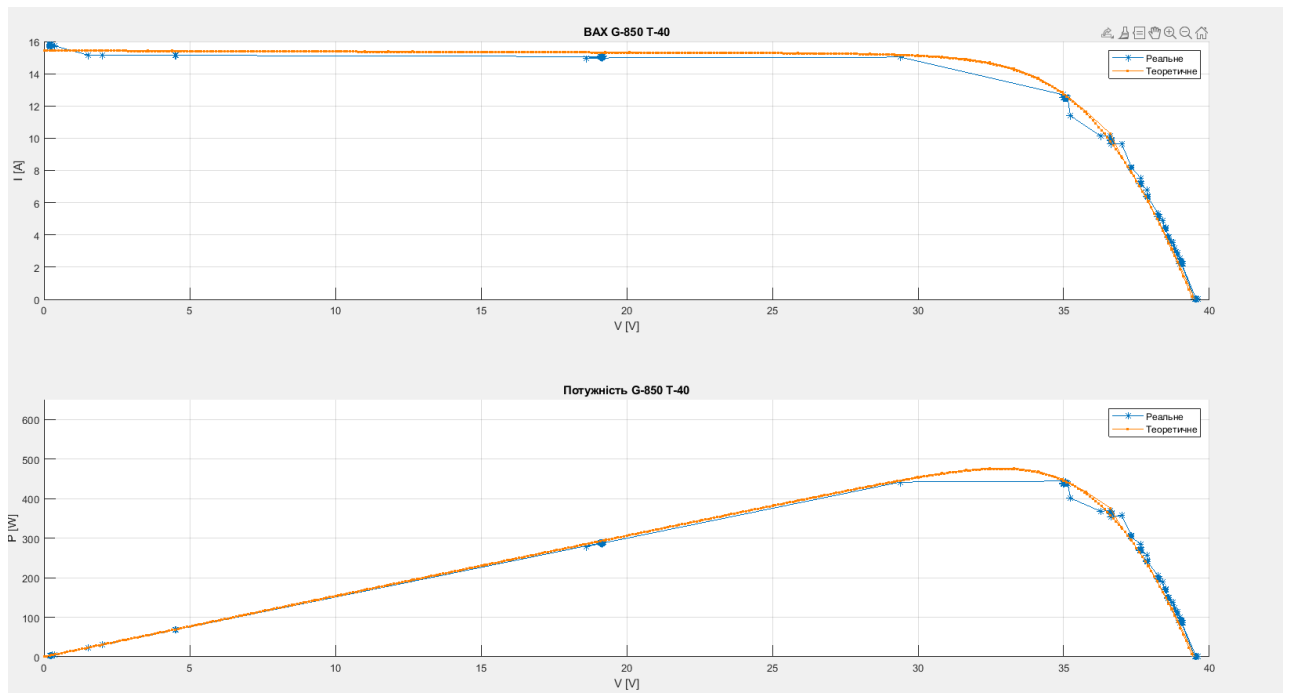


Рисунок 3.11 – Порівняння результатів моделювання сонячної панелі з реальними даними експерименту при G-850 T-40

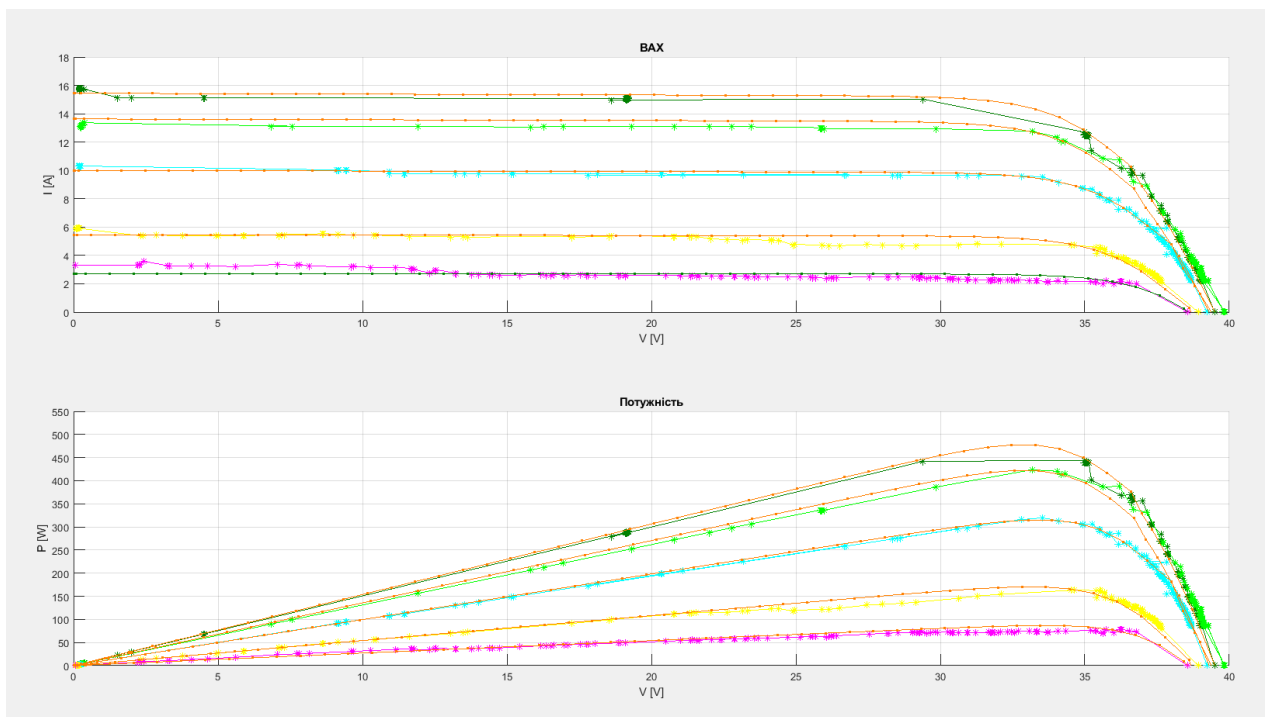


Рисунок 3.12 – Порівняння результатів моделювання сонячної панелі з реальними даними експерименту

Розроблена модель сонячної панелі може бути ефективно використана для вирішення різноманітних завдань у сфері фотоелектричних систем. Серед них:

- оптимізація схеми підключення сонячних панелей: використання моделі дозволяє провести аналіз та підбір оптимального способу підключення панелей для максимізації ефективності системи;
- аналіз потужності при наявності прогнозу погоди: модель дозволяє проводити аналіз роботи мобільних сонячних електростанцій, враховуючи передбачені показники температури та освітлення, що в свою чергу дозволить передбачити доступну зелену енергію для використання улюбій точці світу;
- моделювання процесу відслідковування траєкторії максимальної потужності (ТМП): модель може бути використана для симуляції та вивчення процесу відслідковування ТМП при змінах освітленості та температури;
- оцінка схемних втрат: можливість аналізу схемних втрат дозволяє ефективно визначити втрати енергії в системі та розробити заходи для їхнього зменшення;
- розрахунок і моделювання сонячних систем електроживлення: За допомогою моделі можна ефективно розрахувати та спроектувати сонячні системи електроживлення для різноманітних застосувань;
- аналіз та прогнозування роботи сонячних електростанцій: модель дозволяє проводити аналіз роботи сонячних електростанцій, враховуючи різні параметри та умови експлуатації, що сприяє ефективному прогнозуванню їхньої роботи.

### 3.3 Моделювання процесу відслідковування точки максимальної потужності

Моделювання процесу відслідковування точки максимальної потужності в Simulink може бути виконано за допомогою різних блоків та інструментів, які надає це програмне забезпечення. Для більшості випадків користувачу вистачить блоку PV Array, який після обробки видає такі данні як струм напруга потужність та

вихідні параметри, але проблемою цього блоку є відсутність можливості налаштувати зовнішні опори, яку ми виправили у нашій моделі. [23]

В Matlab Simulink, який використовувався у нашій роботі, відслідковування точки максимальної потужності (MPPT) відбувається за допомогою блоку PV Array (фотоелектричний елемент). Цей блок дозволяє моделювати фотоелектричний ефект і забезпечує можливість вибору різних алгоритмів MPPT, таких як P&O (Perturb and Observe), Incremental Conductance, або Constant Voltage.

Порушуй і спостерігай (P&O). [24] Цей алгоритм вносить невеликі зміни у вихідну напругу сонячної панелі та відстежує як ці зміни впливають на вихідну потужність. Якщо потужність зростає, алгоритм продовжує вносити зміни того самого характеру, збільшувати або зменшувати напругу до моменту який буде вважатися точкою максимальної потужності. [25] Якщо потужність зменшується, алгоритм почне вносити протилежні зміни напруги для знаходження точки максимальної потужності. Крок та стартові параметри можна задавати вручну.

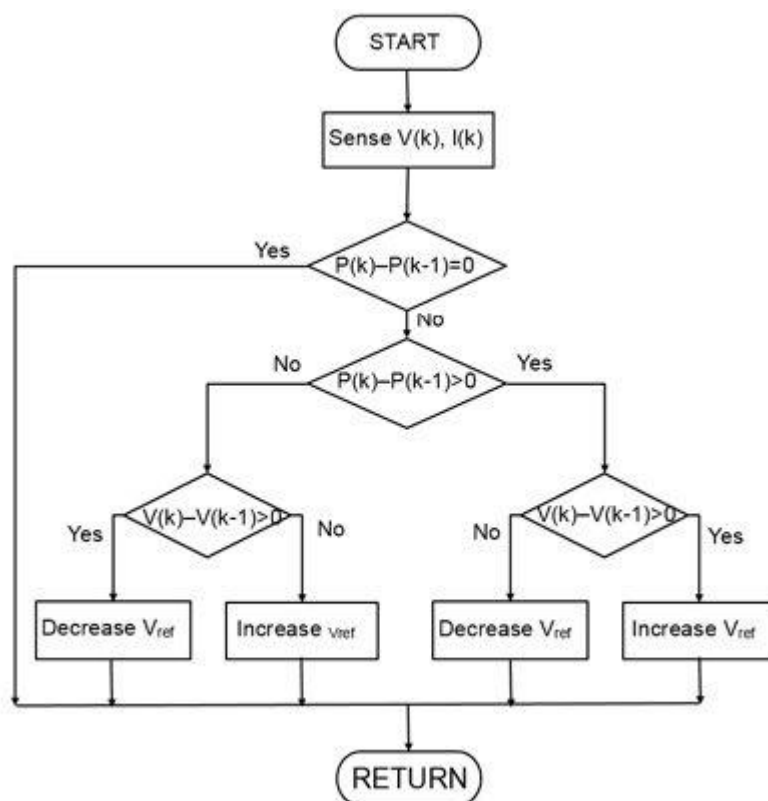


Рисунок 3.13 – Блок схема роботи базового Порушуй і спостерігай алгоритму



Constant Voltage. Цей алгоритм використовує фіксоване значення напруги для забезпечення найвищої потужності. Він вимірює струм та збільшує або зменшує напругу до тих пір, поки струм не досягне максимального значення, а потім коригує напругу для максимізації потужності.[26] Немає конкретної формули, оскільки напруга залишається сталою. Рідко використовується, Алгоритм Constant Voltage є одним із методів Maximum Power Point Tracking в сонячних енергетичних системах. Основна перевага цього методу полягає в його простоті та високій ефективності в певних умовах. Простий в реалізації: Алгоритм Constant Voltage відзначається простотою в реалізації. Особливо важливо для промислових застосувань та систем, де важлива надійність та простота обслуговування. Стабільність роботи: Метод Constant Voltage забезпечує стабільну роботу системи в умовах змін освітленості та температури. Він дозволяє утримувати напругу на сонячній панелі на стабільному рівні, що може бути важливо для деяких типів навантаження. Висока ефективність в певних умовах: Constant Voltage може бути ефективним у випадках, коли освітленість відносно стабільна та не відбуваються різкі коливання.[27] У таких умовах він може надавати стабільну вихідну потужність. Відсутність частотних коливань: Оскільки метод Constant Voltage працює на принципі утримання постійної напруги, він може уникати частотних коливань, що може бути важливо в деяких застосуваннях, де важлива стабільність напруги. Можливість працювати з різними видами акумуляторів: Метод Constant Voltage може легко інтегруватися з різними типами акумуляторів, оскільки його основна функція - утримання стабільної напруги - не залежить від конкретного типу акумулятора. Саме цей алгоритм ми і будемо використовувати у нашій моделі.[28]

Ось покрокова інструкція, як використовувати блок PV Array для відслідковування точки максимальної потужності:

1. Додавання блоку PV Array: відкрийте Simulink та відкрийте вашу модель.- Знайдіть в бібліотеці блок PV Array. Виберіть "Library Browser", а потім знайдіть блок PV Array у розділі "Simscape" або "Simscape > Foundation Library > Electrical

> Specialized Power Systems > Machines".- Перетягніть блок PV Array на вашу модель.

2. Конфігурація блоку PV Array: двічі клацніть на блоку PV Array, щоб відкрити його параметри.- У розділі "MPPT Algorithm" виберіть алгоритм MPPT, який ви хочете використовувати (наприклад, P&O, Incremental Conductance тощо).- Налаштуйте параметри MPPT-алгоритму за необхідності, такі як кроки, пороги тощо.

3. Симуляція:- запустіть симуляцію вашої моделі.

4. Аналіз результатів:- використовуйте блоки вимірювання (наприклад, Scope) для візуалізації вхідного сигналу (напруги та струму сонячної панелі) і вихідного сигналу (потужності).

Ці кроки є загальними та можуть змінюватися в залежності від конкретної версії Simulink та вашої моделі.

Для прикладу розглянемо фотоелектричний модуль RSM120-8-590BMDG. В таблиці 3.1 наведені параметри для даної сонячної панелі.

Дана сонячна панель характеризується значенням максимальної потужності 590 Вт при освітленості в 1000 Вт/м<sup>2</sup>, але потужність може бути більшою завдяки зворотній стороні панелі яка працює як додаткова сонячна панель, при моделюванні ми будемо враховувати що панель отримує недостатньо освітлення на зворотну сторону.

Таблиця 3.1 – Параметри фотомодуля CL-P72300

$I_{SC0}$ , А	$V_{oc0}$ , В	$I_{mp0}$ , А	$V_{mp0}$ , В	$P_{mp0}$ , Вт	$K_I$ , 1/А	$K_V$ , 1/В	$N_s$	$R_s$ , Ом	$R_{sh}$ , Ом
18,16	41,3	17,15	34,42	590(+0-25%)	0,004	-0,25	120	0,022	2

На рисунку 3.15 зображена Simulink-модель, для моделювання роботи RSM120-8-590BMDG, при зміні інтенсивності сонячного випромінювання. Дана схема передбачає вимірювання значень струму, напруги та потужності безпосередньо на виході СП та на зовнішньому навантаженні. [29]

Параметри модуля PV Array заповнені відповідно до показників із таблиці 3.1. Трекер точки максимальної потужності (ТМП), представлений елементом "MPPT", отримує вихідні параметри струму та напруги сонячної панелі. Після цього він повертає оптимальне значення коефіцієнта заповнення. Це значення використовується для формування ШИМ-сигналу  $g$  за допомогою блока PWM-Generator. Отриманий ШИМ-сигнал  $g$ , в свою чергу, служить керуючим сигналом для імпульсного перетворювача напруги. Останній відповідає за корекцію вихідної напруги сонячної панелі. Це відбувається шляхом встановлення вихідної напруги на рівень, що відповідає напрузі в точці максимальної потужності. Завдяки такому механізму корекції, система забезпечує ефективне відслідковування точки MPP, оптимізуючи вихідні параметри сонячної панелі для максимальної потужності. [30-32]

На рисунку 3.16 зображений графік зміни інтенсивності сонячного випромінювання протягом моделювання та вплив зміни на потужність.

На рисунку 3.17 зображені графіки струму, напруги та потужності, отримані в результаті моделювання.

Як видно із рисунка 3.18, потужність при старті моделі перевищує максимальну потужність в 590, але через короткий час модель знаходить допустимі точки та показує реальний результат. Також чудово можна побачити процес обрахунку потужності моделі при зміні показнику освітлення.

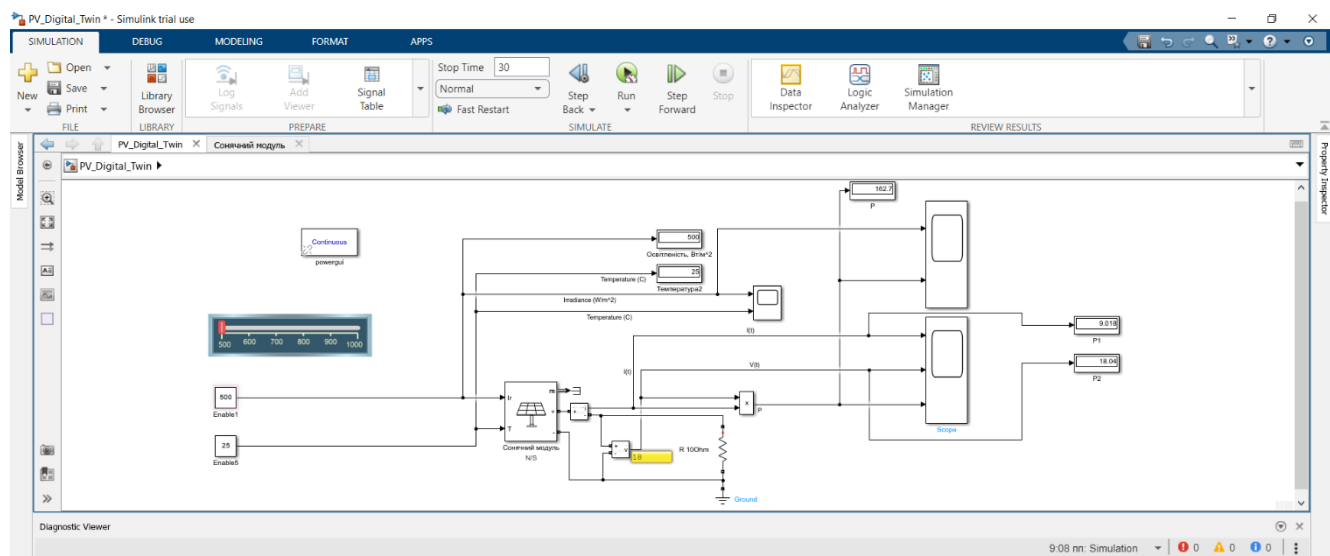


Рисунок 3.15 – Схема для моделювання процесу відслідковування ТМП при зміні інтенсивності сонячного випромінювання

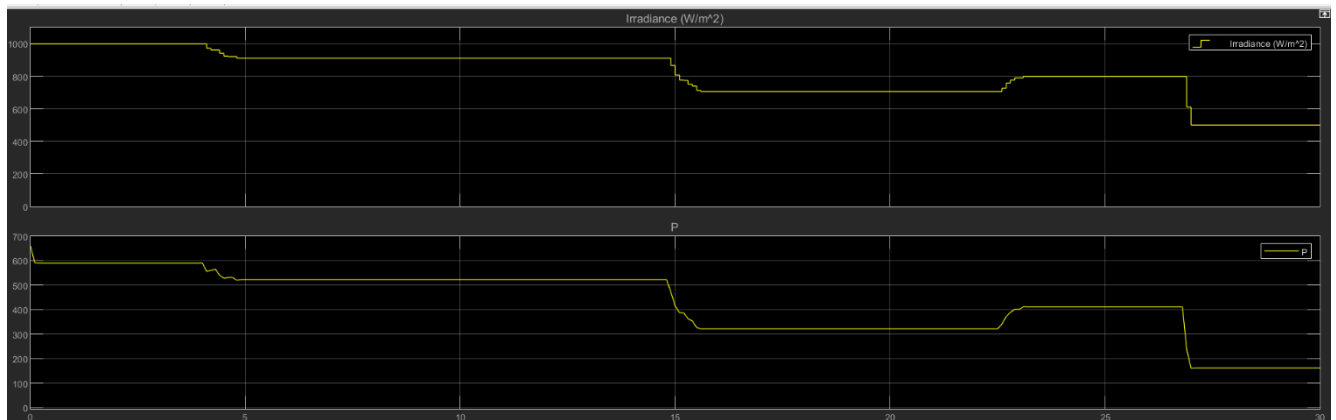


Рисунок 3.16 – Графік зміни інтенсивності сонячного випромінювання та потужності

На рисунку 4.20 зображено фінальну версію для моделювання сонячної панелі при використанні modbus, Simulink-модель, для моделювання роботи RSM120-8-590BMDG, при зміні інтенсивності сонячного випромінювання. Дана схема передбачає вимірювання значень освітлення та температури датчиками, та передачу на сонячну панель, наступні процеси співпадають із попереднім етапом. Результат зберігається в файлі mat.

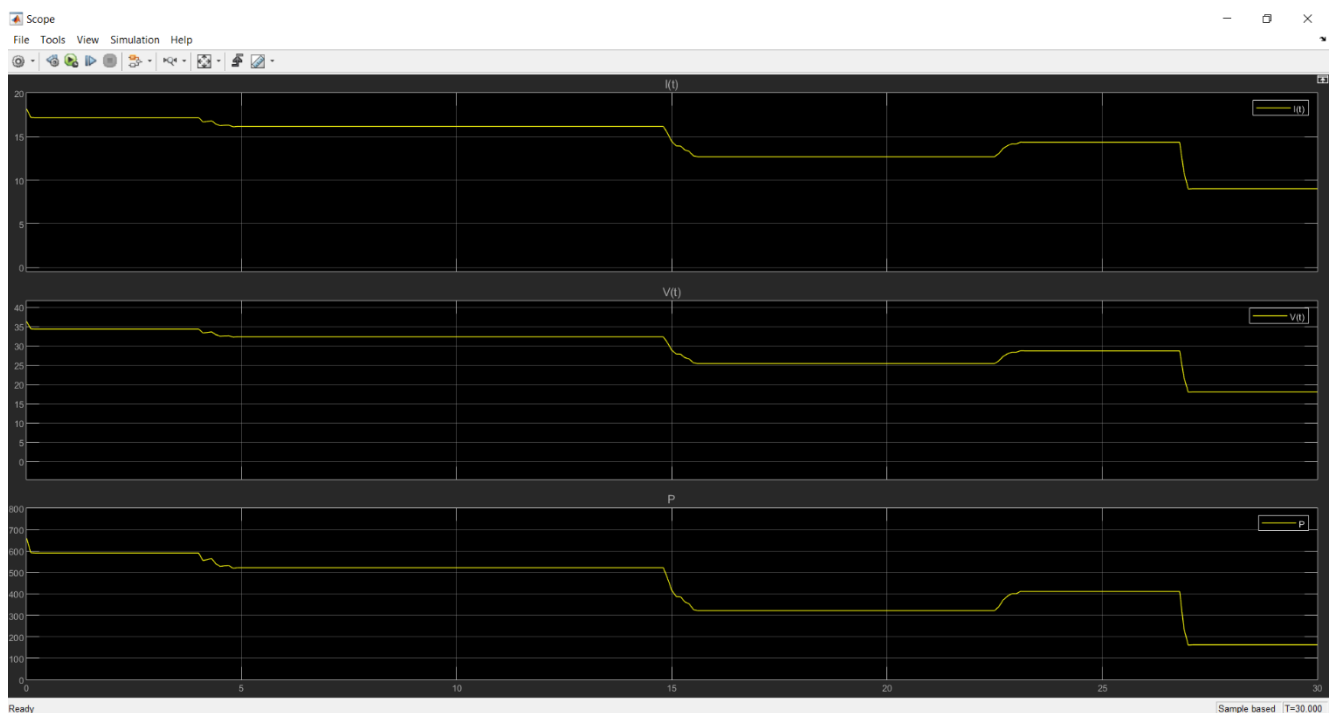


Рисунок 3.17 –Графіки змін струму, напруги та потужності при зміні інтенсивності сонячного випромінювання

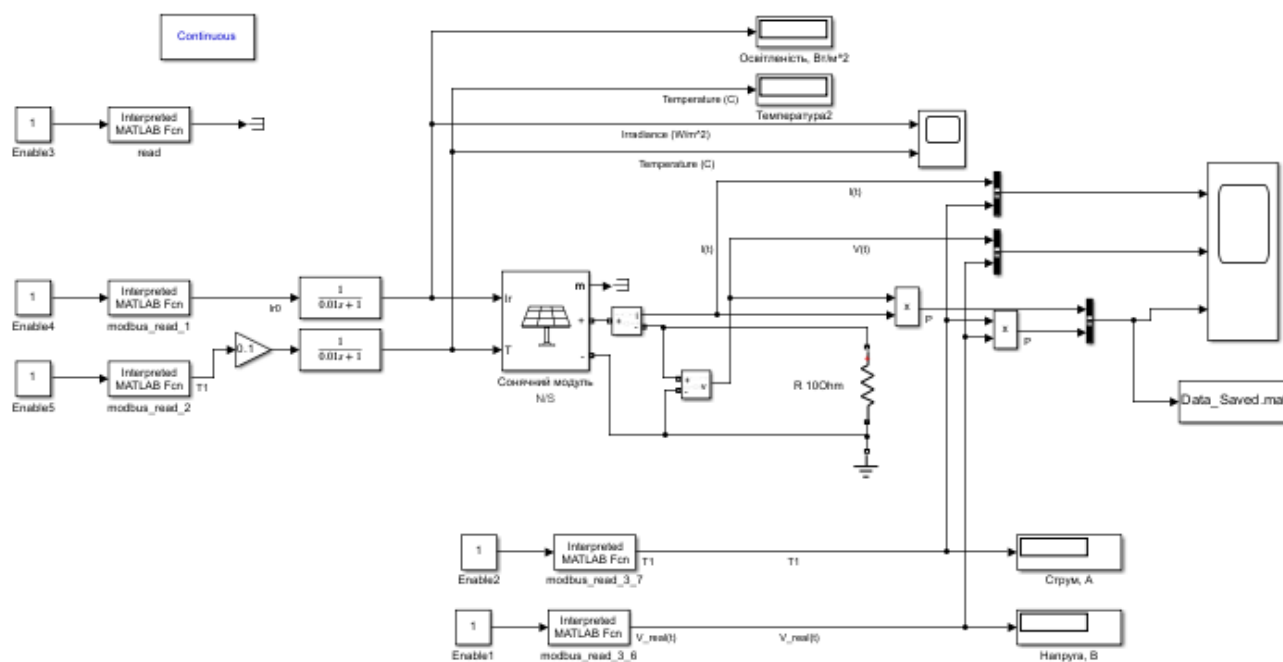


Рисунок 3.18 –остаточна модель Simulink для моделювання сонячної панелі з використанням датчиків

### Висновки до третього розділу

В цьому розділі представлені алгоритми та технології, які визначають можливість створення імітаційної моделі процесу виробництва електричної енергії сонячною електростанцією з використанням оптимізатора точки максимальної потужності. Алгоритм інкрементної провідності виявляється оптимальним для відтворення процесу відслідковування точки максимальної потужності. Його можна легко реалізувати в середовищі Matlab Simulink слідуючи алгоритмам, та теоріях представлених в попередніх розділах. Для моделювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) та вольт-ватних характеристик (ВВХ) можна використовувати існуючі елементи PV Array, що дозволяють виконати моделювання сонячних панелей та вплив на них. Розрахунок теоретичного значення максимальної потужності виконується шляхом вирішення аналітичних рівнянь та представляється за допомогою елементу scope.

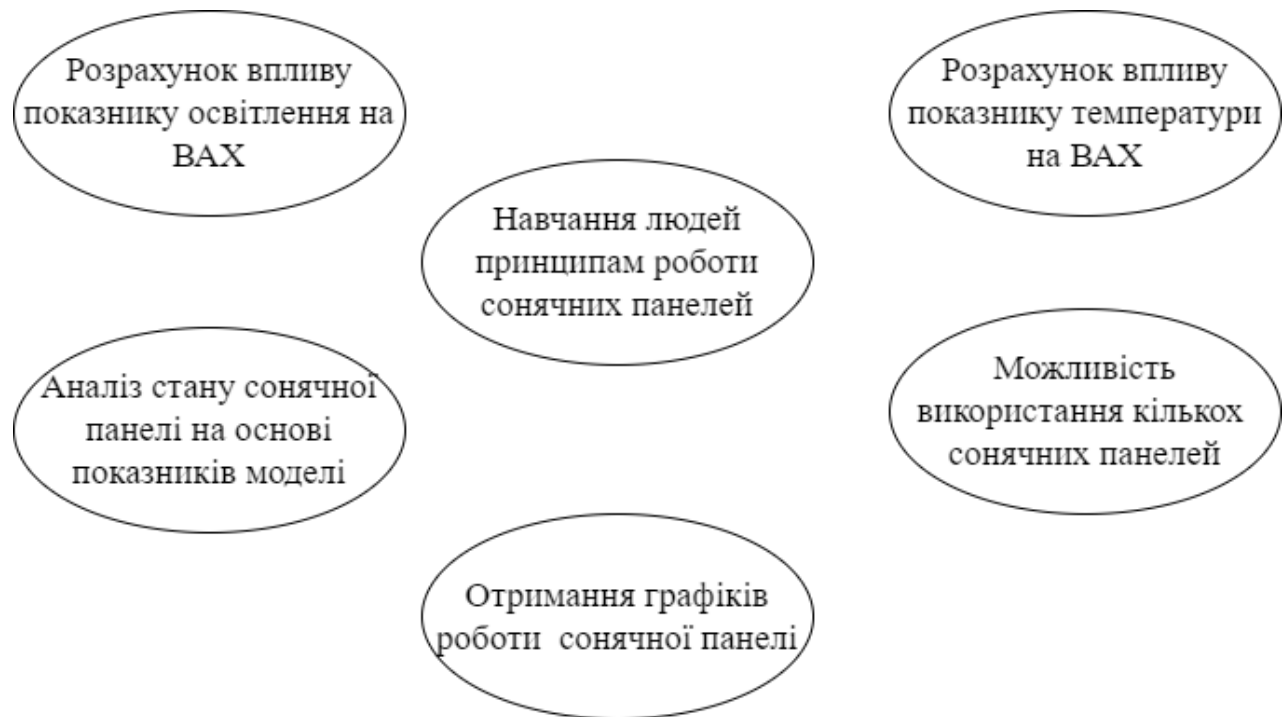


Рисунок 3.19 – Варіанти використання моделі

На основі вищесказаного сформулюємо загальні вимоги до реалізації імітаційної моделі розрахунку системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо.

Функціональні вимоги:

- розрахунок параметрів сонячної панелі на основі паспортних даних;
- створення вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячних панелей в однакових умовах оточуючого середовища;
- можливість задання певної кількості сонячних панелей;
- моделювання відслідковування точки максимальної потужності;
- моделювання залежності ТМП від рівня освітленості і температури;
- виведення результатів у вигляді графіків та діаграм;
- можливість задання показників акумуляторів;
- можливість задання показників генератору;
- обчислення вихідної потужності системи;
- можливість вибору режиму роботи.

Нефункціональні вимоги:

- простий інтерфейс користувача;
- зручність у використанні
- швидкість опрацювання даних;
- робота у реальному часі;
- можливість розширення.

Розробка моделі розрахунку системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо передбачає розділення системи на три функціональні модулі:

- модель із симуляцією сонячної панелі, що реалізується в Matlab Simulink;
- модель із контролем режиму роботи;
- група даних збережена у форматі .mat.

## 4 РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ДИЗПАЛИВО ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ПАРАМЕТРІВ

### 4.1 Вибір середовища розробки та мови програмування

У якості інструментальних засобів розробки були обрані середовище MATLAB Simulink та мова програмування MATLAB.

MATLAB використовує власну мову програмування, що також відома як MATLAB. Розроблений компанією MathWorks, цей інструмент призначений для вирішення завдань числових обчислень та обробки матриць. Відзначається широким застосуванням у наукових, інженерних та технічних галузях, включаючи обробку сигналів, аналіз даних, моделювання та розробку систем управління. Мова програмування у MATLAB є високорівневою, спрощуючи виконання математичних операцій, обробку даних і проведення складних обчислень. Крім того, MATLAB володіє значною кількістю вбудованих функцій та інструментів, що полегшують роботу з числовими даними та розв'язання різноманітних задач. [33]

MATLAB використовують для організації, очищення та аналізу складних наборів даних з різних галузей, таких як кліматологія, прогнозування, медичні дослідження та фінанси. MATLAB надає:

- типи даних і можливості попередньої обробки, призначені для інженерних і наукових даних;
- інтерактивні візуалізації даних, що легко налаштовуються;
- додатки та завдання в редакторі Live Editor, які допомагають в інтерактивному очищенні, підготовці та генерації коду даних;
- тисячі вбудованих функцій для статистичного аналізу, машинного навчання та обробки сигналів;
- обширна та професійно написана документація;
- прискорена продуктивність завдяки простим змінам коду та додатковому обладнанню;

- розширення аналізу до великих даних без значних змін коду;
- автоматичне пакування результатів аналізу у вільно розповсюджені програмні компоненти або вбудований вихідний код без ручного перекодування алгоритмів;
- звіти у форматі Sharable, автоматично створені на основі вашого аналізу.

Simulink - інтерактивний інструмент для моделювання, проектування та аналізу даних. Інтеграція віртуальних систем може допомогти зменшити залежність від прототипів апаратного забезпечення і надати всім доступ до системи практично на будь-якій стадії циклу розробки продукту. [34] Користувачі можуть використовувати Simulink для моделювання, імітації та аналізу складних віртуальних систем, що складаються з фізичного обладнання, вбудованого програмного забезпечення, алгоритмів і середовища, в якому працює система. Simulink дозволяє:

- описувати архітектуру системи за допомогою інтуїтивно зрозумілих архітектурних моделей;
- моделювати системи, що охоплюють декілька доменів, використовуючи специфічні для домену інструменти та готові блоки;
- розробляти підтримувані великомасштабні моделі з багаторазово використовуваними і готовими до запуску компонентами;
- легко та надійно інтегрувати компоненти з різних команд та інструментів в одну симуляцію системного рівня;
- моделювати та аналізувати, щоб зрозуміти та підтвердити поведінку системи;
- можливість запускати масивні симуляції на комп'ютері, кластері або в хмарі;
- розгорнути симуляції як окремі виконувані файли.

## 4.2 Опис компонентів програмного засобу імітаційної моделі

Перелік блоків використаних для імітаційного моделювання:

Powergui - Блок powergui дозволяє вибрати один з цих методів для розв'язання схеми: Безперервний, який використовує вирішувач зі змінним кроком від Simulink; Дискретизація електричної системи для розв'язання з фіксованим кроком за часом; Безперервне або дискретне розв'язання фазової схеми. [35] Блок powergui також відкриває інструменти для аналізу стаціонарного режиму і результатів моделювання, а також для розширеного проектування параметрів.;

Interpreted MATLAB Function рисунок 4.1- Інтерпретований функціональний блок MATLAB застосовує вказану функцію або вираз MATLAB до входу. Вихід функції повинен відповідати вихідним розмірам блоку;

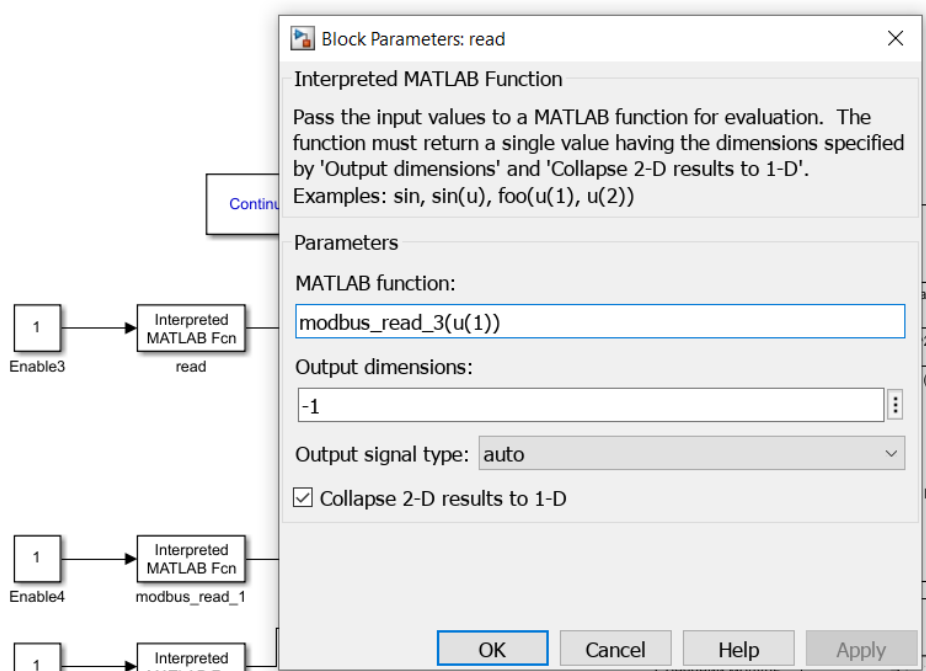


Рисунок 4.1 - Interpreted MATLAB Function та імплементація функції

To File. Блок To File записує дані вхідного сигналу у MAT-файл. Блок записує у вихідний файл інкрементно, з мінімальним використанням пам'яті під час симуляції. Якщо на момент запуску симуляції вихідний файл вже існує, блок перезаписує його. Файл автоматично закривається, коли ставиться симуляцію на

паузу або коли симуляція завершується. Якщо симуляція завершується помилкою, блок To File зберігає дані, які були записані до моменту аварійного завершення. Блок зберігається у папці з файлом моделі.

Score. Відображення сигналів, згенерованих під час симуляції. Елемент score має лише елементи входу, від одного до кількості заданої користувачем. Для кожного входу будується окремий графік, в налаштуваннях можна обмежити графіки та повністю їх відкоригувати. [36, 37]

Перемикач тумблерів. Блок Toggle Switch перемикає значення параметра підключеного блоку між двома значеннями під час моделювання, блок не під'єднується до елемента напряму, користувач повинен відкрити елемент та налаштувати зв'язки. Наприклад, користувач може підключити блок Toggle Switch до блоку Switch у моделі і змінювати його стан під час симуляції.

From File рисунок 4.2. Завантажити дані з MAT файлу в Simulink модель. Блок From File зчитує дані в модель з .mat-файлу і надає дані у вигляді сигналу або невіртуальної шини на виході блоку. Модель може містити декілька блоків From File, які завантажують дані з одного .mat-файлу.



Рисунок 4.2 – елемент From File який зчитує данні з файлу Data\_Saved\_PV.mat

PV Array - Блок PV Array реалізує масив фотоелектричних модулів. Масив будується з ланцюжків модулів, з'єднаних паралельно, використовуючи стандартні формули для моделювання сонячних панелей, та даючи змогу вносити персональні зміни. Блок PV Array дозволяє моделювати попередньо встановлені фотоелектричні модулі, у системі збережено понад 100 реальних сонячних панелей, а також фотоелектричні модулі, які визначаються самостійно. Блок PV Array - це п'яти параметрична модель, яка використовує джерело струму, що генерується

світлом, перший вхідний параметр, діод, послідовний опір і шунтовий опір для представлення залежних від освітленості і температури I-V характеристик модулів.

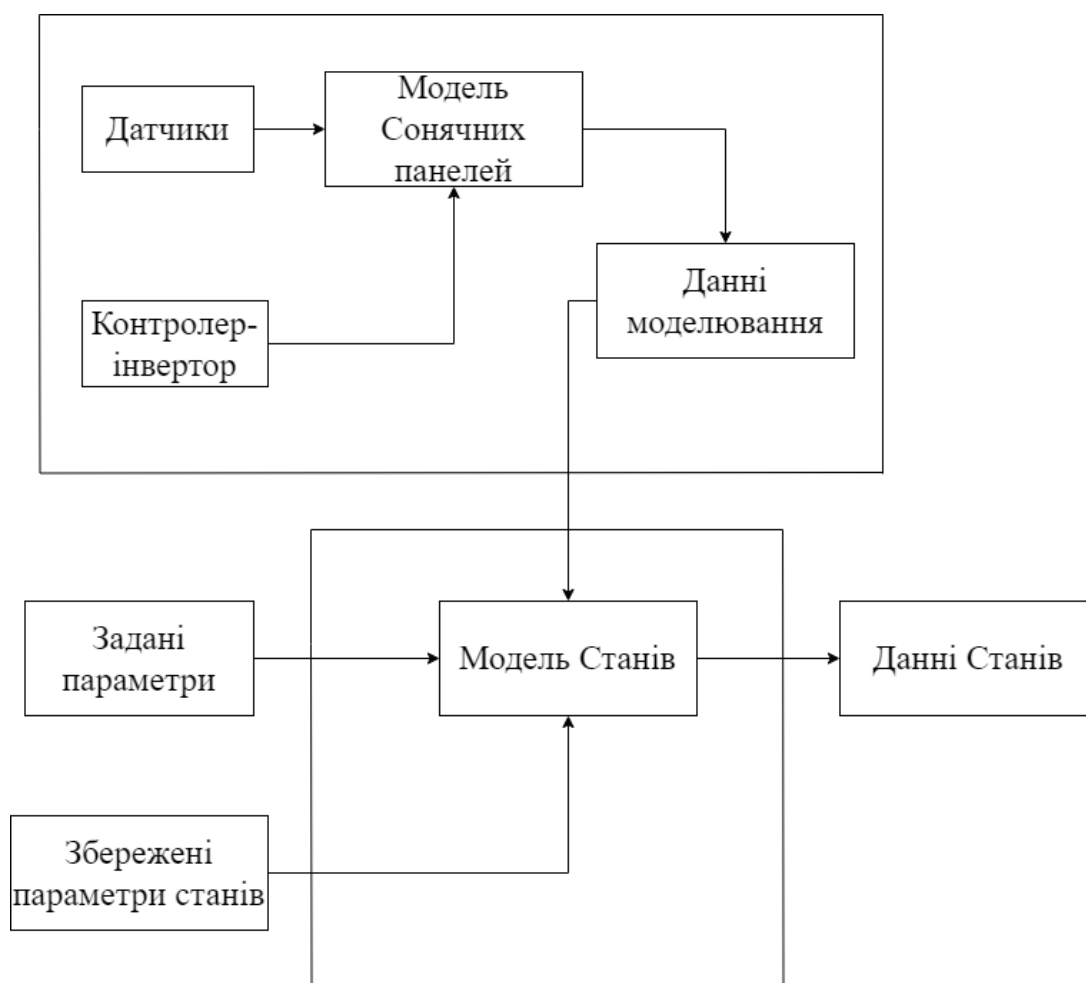


Рисунок 4.3 Структура роботи системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

#### 4.3 Опис інтерфейсу користувача та інструкції із використання

Високоєфективна модель системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо була реалізована у додатку для моделювання Matlab Simulink. В якості мови програмування використовувалася мова Matlab. Для побудови користувацького інтерфейсу використовувалися стандартні елементи та додаткове кодування у Simulink. Архітектура моделі описано в розділі 4.2.

На рисунку 4.4 зображено State.slx, яка виконує роль головного вікна моделі системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

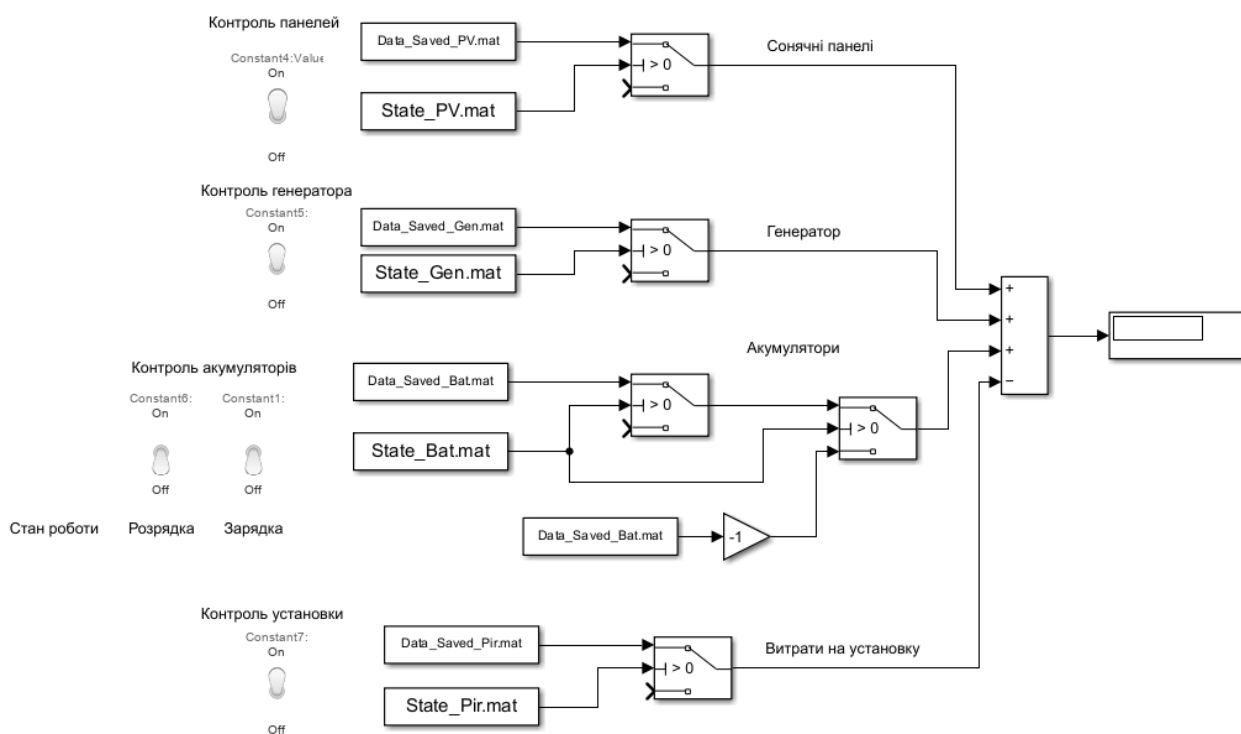


Рисунок 4.4 – Головне вікно файлу Stat.slr

Головне вікно додатку складається із наступних груп елементів:

- перемикачі стану, відповідають за стан роботи системи, кожен із станів підвантажуються із персонального збереженого .mat файлу.
- збережені показники датчиків у форматі .mat, показники зберігаються у середині додаткового модельного файлу;
- перемикач switch, стандартний перемикач який відповідає за проходження сигналу показників;
- елемент add, котрий приймає показники після проходження перемикачів;
- блок Gain, який перетворює сигнал на від'ємний.

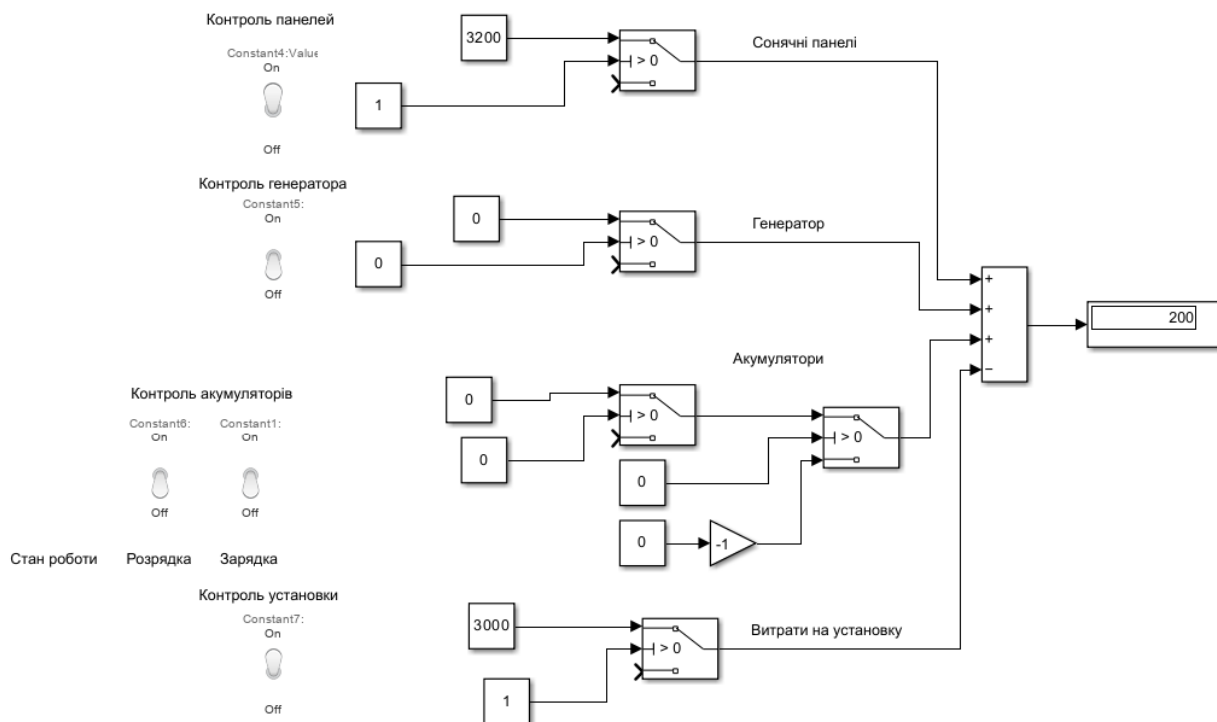


Рисунок 4.5 – Головне вікно файлу Stat.slr, при моделюванні живлення від сонячних панелей

На рисунку 4.5 зображено один із станів роботи системи, при якому система живиться від групи сонячних панелей, потужність отримана від них складає 3200 Вт, генератор та група акумуляторів відімкненні, установка для переробки полімерних відходів у дизпаливо працює та споживає потужність 3000Вт, яка була виміряна та вказана константою. Якщо користувачу буде необхідно змінити споживання установки, при використанні іншої установки або додаткових споживачів, зміни легко можна записати у файл `Data_Saved_Pir.mat`. [38, 39] Число виведене на крайній правий дисплей відповідає енергії яка залишається після проходження системи, якщо число є додатнім, отже ми маємо надлишок енергії, який у прикладі склав 200Вт, якщо число від'ємне, це свідчить про недостачу енергії для живлення системи. При необхідності можна змінити режим роботи, увімкнувши зарядку акумуляторів надлишком енергії у системі або розрядку

акумуляторів для покриття недостачі. За зарядку та розрядку акумуляторів відповідає інвертор-контролер заряду.

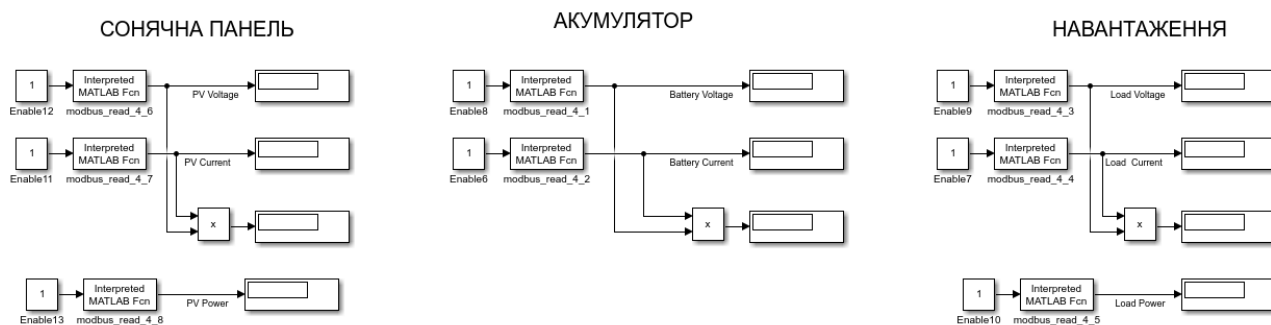


Рисунок 4.6 – Частина вікна файлу PV\_Digital\_Twin.slr

Як видно з рисунку 4.6, модель отримує такі параметри як:

- силу струму сонячної панелі;
- напругу сонячної панелі;
- потужність сонячної панелі;
- силу струму розрядки акумулятору;
- напругу розрядки акумулятору;
- силу струму навантаження;
- напругу навантаження;
- потужність навантаження.

Це лише кілька основних параметрів, система може виводити набагато більше параметрів, але ці параметри будуть залежати від версії та типу контролера заряду, у нашому прикладі ми використовували row-hvm3.2h-24v, який може передавати параметри вказані в таблиці 4.1.[40]

Таблиця 4.1 – частина параметрів які може передавати row-hvm3.2h-24v

Напруга сонячної панелі	V
Сила струму сонячної панелі	A
Потужність сонячної панелі	W
Струм акумулятору	A

Кінець таблиці 4.1

Напруга акумулятору	V
Потужність заряду	W
Сила струму зарядки	A
Напруга зарядки	A
Частота вхідна	Hz
Частота вихідна	Hz
% навантаження прийнятного для конкретного інвертора	%
Навантаження	VA
Навантаження	W
% заряду акумуляторів	%
Режим роботи інвертору (1-12)	Число
Сигнал помилки	Число
Тип батареї	Слово
Обмеження вихідної напруги	V
Обмеження вихідної сили струму	A
Обмеження вихідної потужності	W
Обмеження рамок вхідної напруги	V
Обмеження рамок вхідної сили струму	A
Обмеження рамок вхідної потужності	W
Обмеження заряду акумуляторів	%
Пріоритети роботи	SBU priority/Solar First
Пріоритети зарядки	Cut/Cso/Snu/OSO
Контроль сигналу	On/Off
Вирівнювач заряду акумуляторів	En/Ds
Інтервал вирівнювача заряду акумуляторів	0-90 days

Представлена таблиця показує частину даних до яких користувач матиме доступ завдяки Modbus, але при використанні різних типів контролерів заряду слід переконатися в співпадінні швидкості зчитування приладу а також знайти в документації (якщо така інформація присутня) реїстри присвоєні певній інформації. Однією з проблем зчитування може стати заміна молодшого і старшого байта, через що данні будуть відображатися некоректно, але це відобразиться лише на прямому зчитуванні з приладу.

#### 4.4 Імітаційне моделювання сонячної електростанції

Для розрахунку вихідної потужності сонячних панелей було розроблено додаткову модель, PV\_Digital\_Twin.slr, яка зберігає вихідні параметри та перезаписує їх у основну модель, а остаточна модель сонячної електростанції представлено на рисунку 4.7.

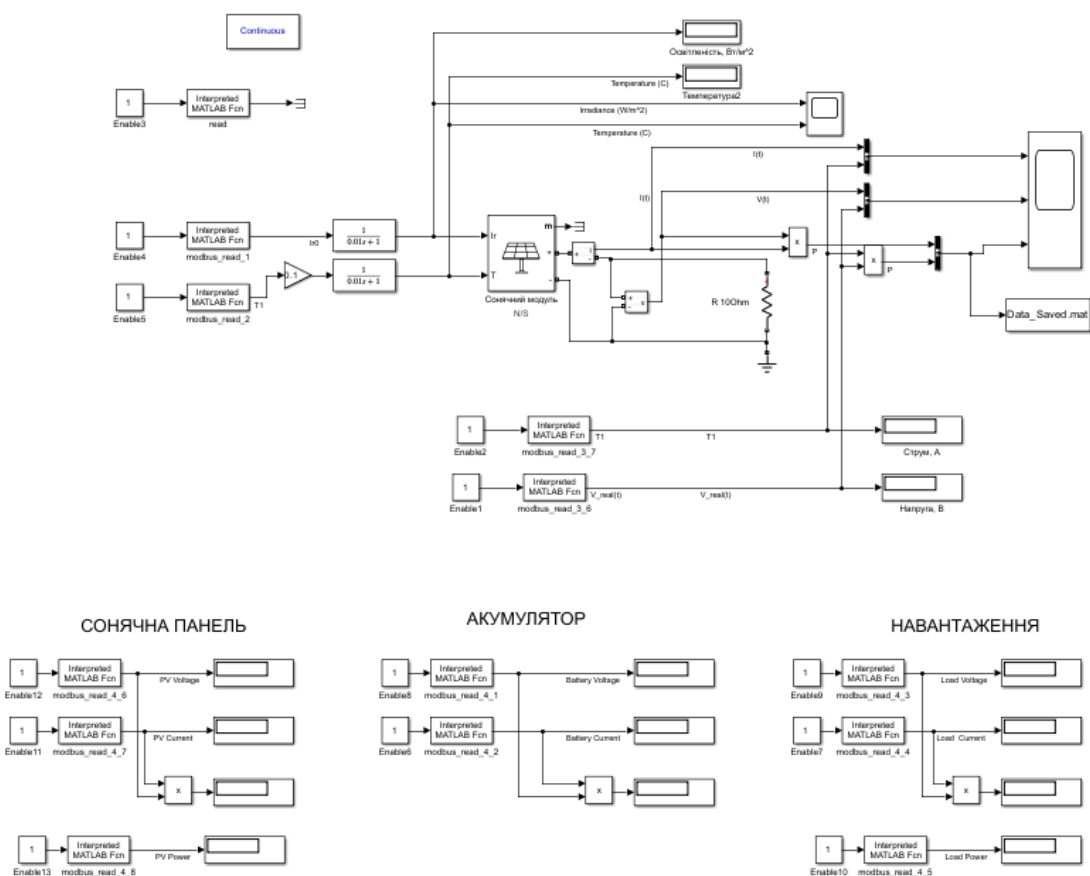


Рисунок 4.7 Модель сонячної панелі PV\_Digital\_Twin.slr

Вихідними даними для імітаційної моделі, PV\_Digital\_Twin.slr, є параметри сонячного панелі, та кількість послідовно з'єднаних сонячних панелей[41, 42]. В якості прикладу знову розглянемо модель використану у лабораторних дослідженнях, RSM-8-590 BMDB

В таблиці 4.2. представлені параметри даної сонячної панелі, надані виробником, та відповідають стандартним тестовим умовам.

Таблиця 4.2 – Параметри RSM-8-590 BMDB при стандартних тестових умовах

Параметр	Значення
Максимальна потужність, Вт	590
Технологія комірок	12BB
Напруга при максимальній потужності,	34.32
Струм при максимальній потужності, А	17.2
Напруга холостого ходу,	41.2
Струм короткого замикання, А	18.21
Максимальна напруга системи,	1500
Максимальний струм, А	30
Кількість комірок, шт	120 [6*10+6*10]
Робоча температура, °С	-40 < t < +85
ККД. не менше, %	20.8

Використовуючи розроблений програмний засіб, ми проведемо детальне моделювання характеристик фотоелектричного модуля. В ході цього моделювання будуть розглядатися криві напруги та потужності при різних рівнях значення інтенсивності сонячного випромінювання та температури.

На рисунках 4.8, 4.9 представлені графіки ВАХ (вольт-амперна характеристика) та ВВХ (вольт-ваттна характеристика) фотомодуля RSM-8-590 BMDB при температурі 25 градусів Цельсія та освітленні 1000 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>,

300 W/m<sup>2</sup> та 0 25 45 градусів Цельсія та освітленні 1000 W/m<sup>2</sup> відповідно. Ці графіки дозволяють визначити, як модуль реагує на зміни інтенсивності сонячного випромінювання.

Моделювання таких характеристик важливе для розуміння та оптимізації роботи фотоелектричних систем в різних умовах експлуатації. Отримані результати можуть бути корисними для вибору оптимальних параметрів системи та підвищення її ефективності в реальних умовах експлуатації.

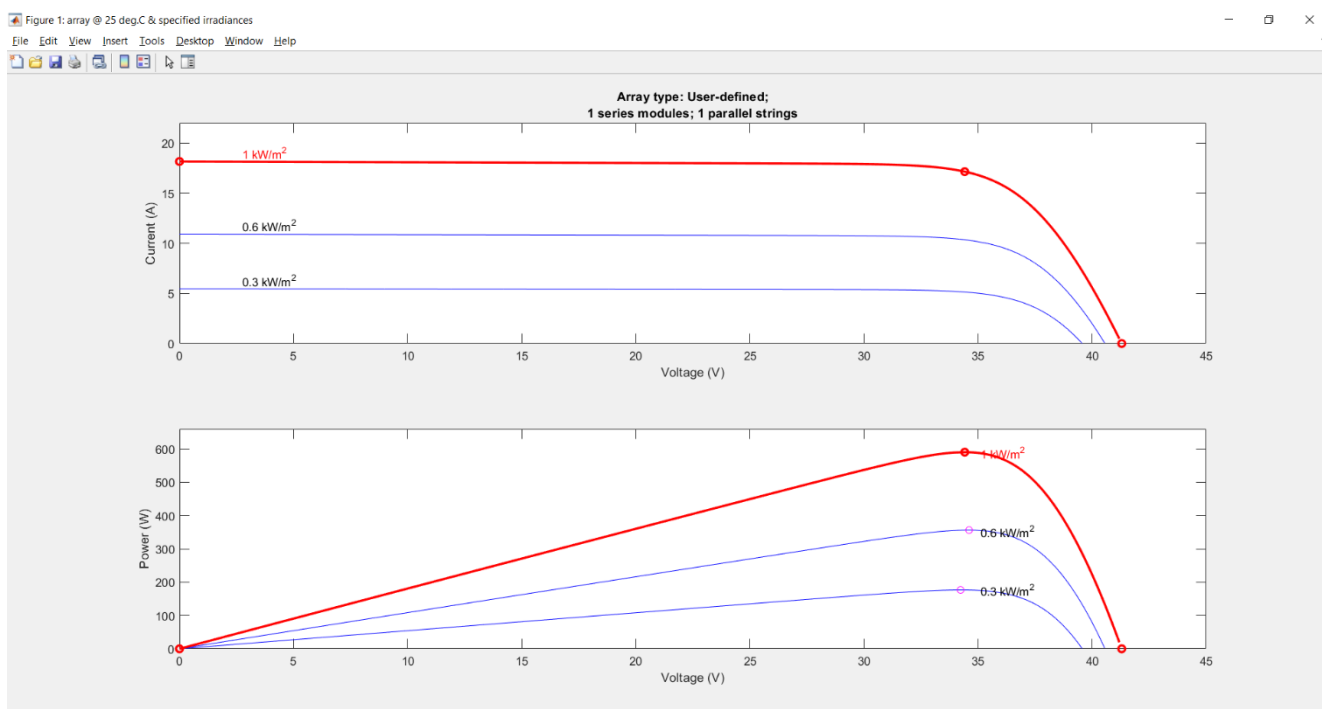


Рисунок 4.8 – Графіки VAX і VWX при 25° C та 300, 600, 1000 W/m<sup>2</sup>

З аналізу графіків на рисунках 4.8, 4.9 очевидно, що максимальна потужність сонячної панелі безпосередньо залежить від інтенсивності сонячного випромінювання і обернено пропорційна температурі поверхні панелі. Використання температурних коефіцієнтів короткого замикання та холостого ходу у моделі дозволяє нам проводити детальне моделювання вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячної панелі за різних значень температури її поверхні.

Зрозуміло, що зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання збільшується максимальна потужність сонячних панелей. [43] Це можна

відзначити, побудувавши графіки залежності точки максимальної потужності від інтенсивності сонячного випромінювання.

На рисунку 4.9 наведено залежності максимальної потужності сонячної панелі, а також відповідні значення струму і напруги від рівня сонячного випромінювання які отримані за допомогою MODBUS [44]. Це дозволяє глибше розуміти, як різні умови експлуатації впливають на ефективність та характеристики фотоелектричного модуля.

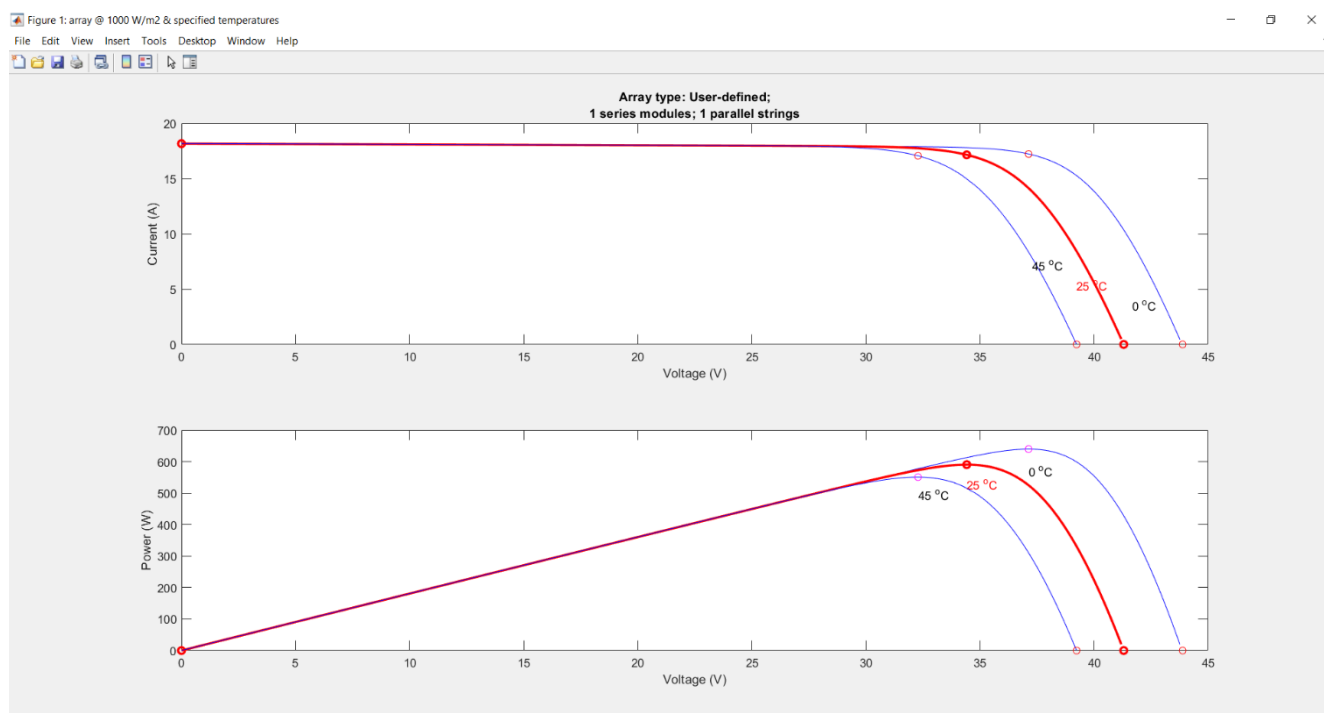


Рисунок 4.9 – Графіки ВАХ і ВВХ при температурах 0°С 25°С 45°С при освітленні 1000 W/m<sup>2</sup>

На рисунку 4.10 зображені залежності максимальної потужності сонячної панелі та відповідні значення струму і напруги від температури поверхні панелі.

Як видно із графіка на рисунку 4.11, із зростанням температури максимальна потужність сонячної панелі падає.

Далі проведемо моделювання у нашій моделі та порівняємо показники отримані при лабораторних вимірюваннях панелі, рисунок 4.13. Показники були зняті у сонячний день, для виміру показнику освітлення та температури використовувались спеціально призначені датчики, для зміни показнику

освітлення сонячну панель відхиляли на певний кут, знімали показники та повторювали процес кілька разів. Результат порівняння усіх знятих та змодельованих даних представлено на рисунку 4.14.

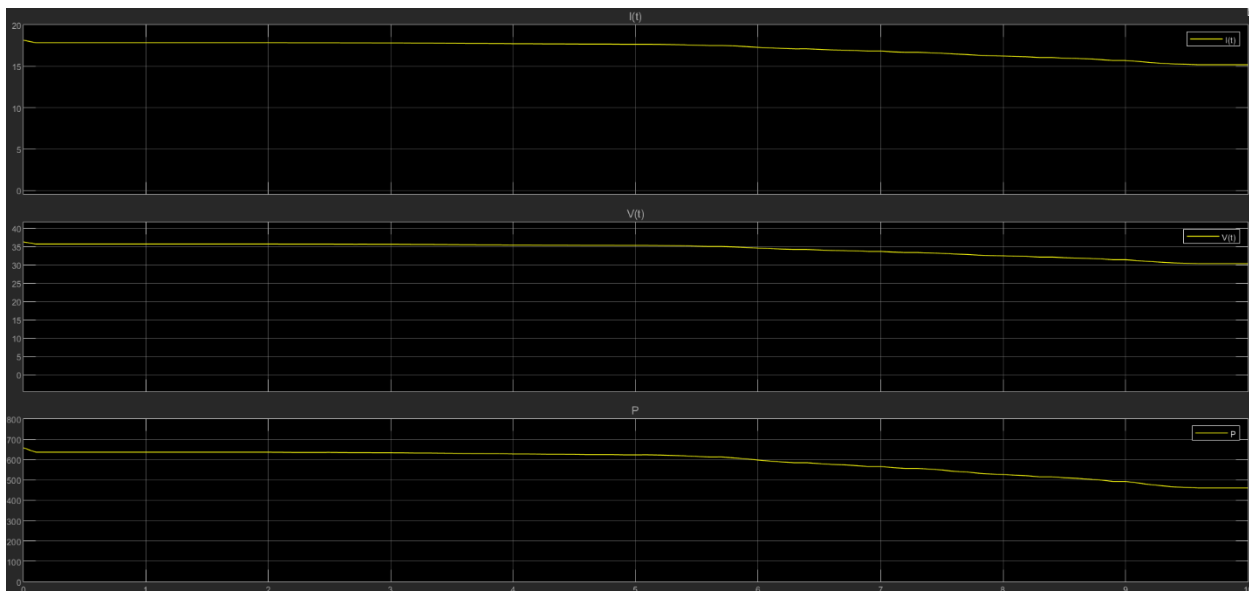


Рисунок 4.10 – показники осцилоскопу при зростанні температури

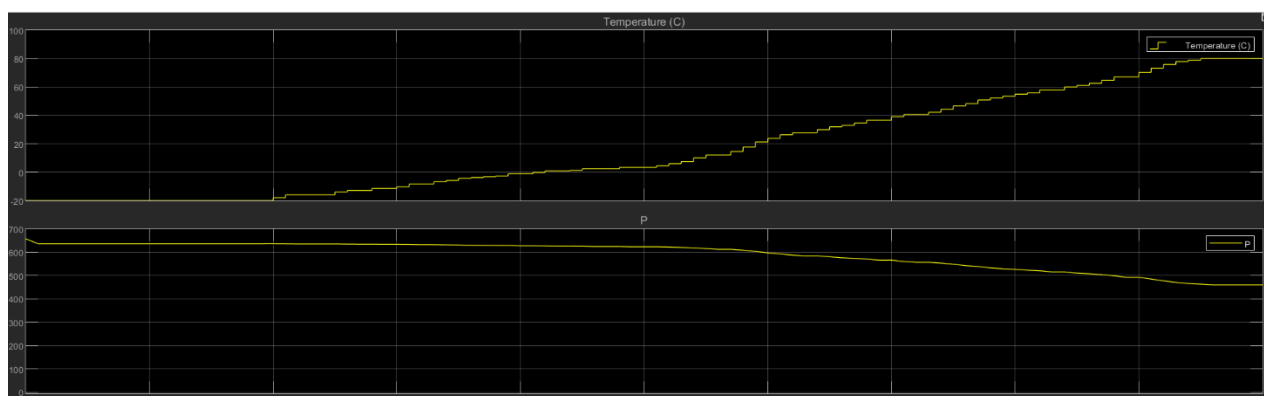


Рисунок 4.11– показники осцилоскопу при зростанні температури



Рисунок 4.12– процес вимірювання показників сонячної панелі

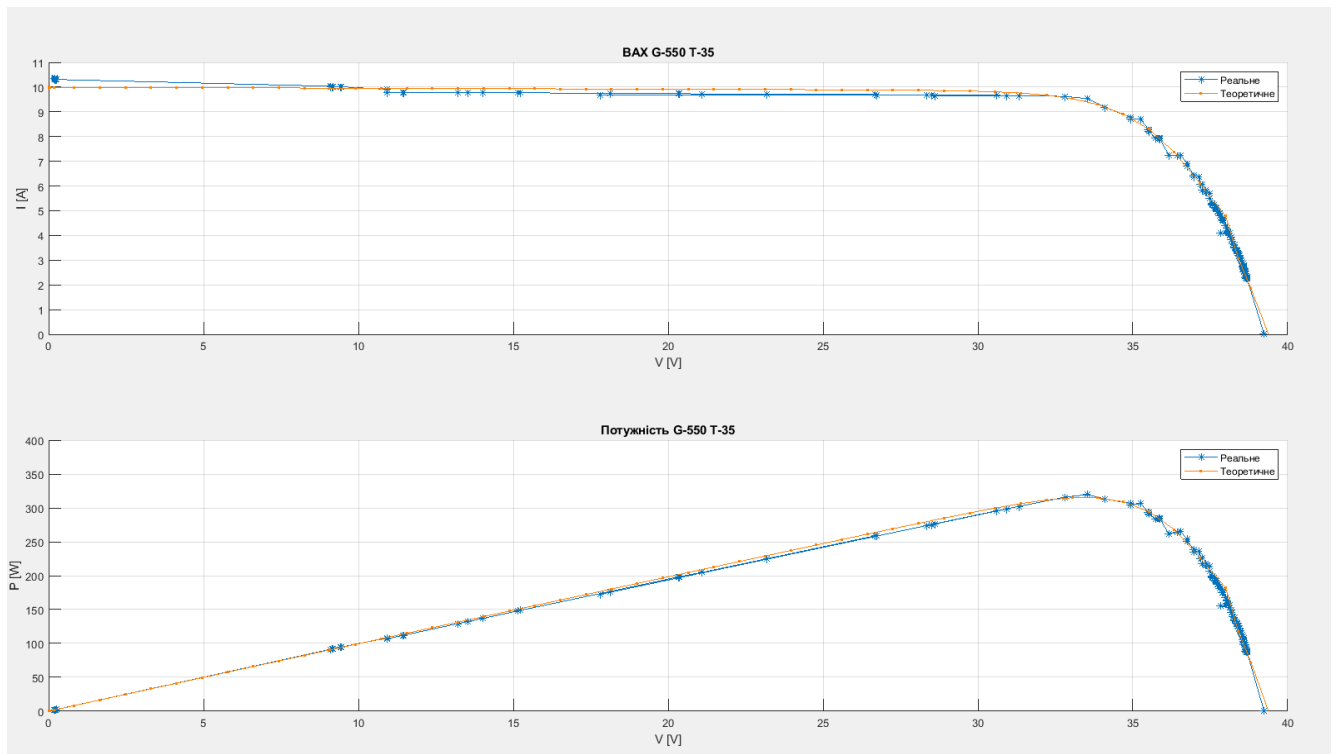


Рисунок 4.13– Порівняння реальних параметрів та змодельованих при G-550 T-35

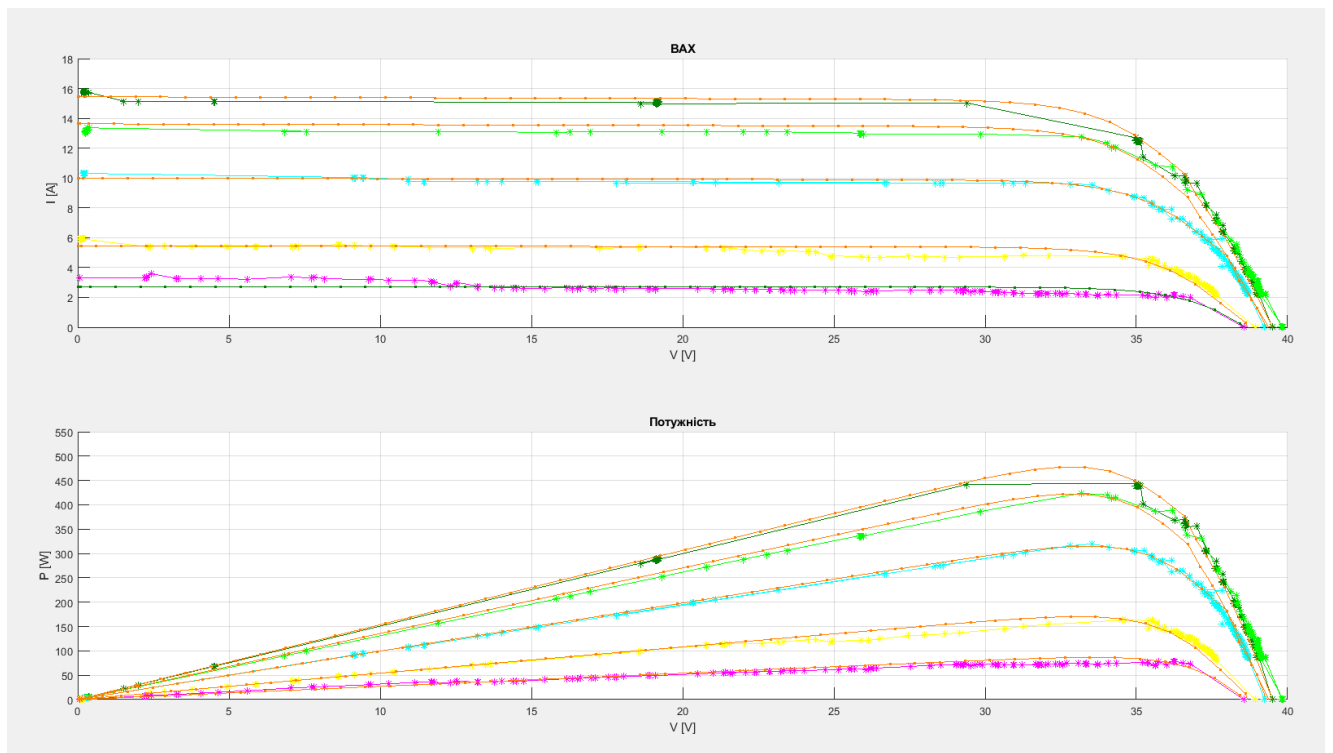


Рисунок 4.14– Порівняння реальних параметрів та змодельованих при різних параметрах освітлення та температури

## Висновки до четвертого розділу

Отже, проаналізувавши роботу високоефективної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо можна зробити висновок, що даний модельний засіб показує дійсні результати та відповідає поставленим вимогам. Отримані в результаті роботи моделі показники відповідають реальним параметрам використаної сонячної панелі, що в свою чергу допоможе при підрахунках необхідної та генерованої потужностей.

Архітектура моделі дозволяє розширення функціональних можливостей, а саме додавання змінних, збереження, внесення нових модульних моделей а також додавання опорів та похибок втрат. Блок моделі відслідковування точки максимальної потужності може бути удосконалений додатковими моделями іншого типу для повторних підрахунків, для прикладу можливо додати кодову частину .mat для математичного розрахунку за іншими методиками, причому, основний інтерфейс та записані параметри залишаться без змін.

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі була розроблена імітаційна модель високоефективної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо.

У першому розділі «аналіз відомих автономних систем електроживлення» було проведено аналіз автономних систем електроживлення, розібрано основні способи покращити їх показники, проведено аналіз доцільності імплементації автономних систем електроживлення у системи, в результаті чого було поставлено завдання для розробки моделі.

У другому розділі «модель автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо та розрахунок її параметрів.» була розроблена формальна модель системи електроживлення, яка складається із сонячних панелей, системи акумуляторів, генератору, та зовнішнього джерела живлення. Також було описано та опрацьовано спосіб передачі даних від датчиків до моделі.

У третьому розділі «алгоритми та технології для моделювання системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо.» було розроблено моделі сонячної панелі в середовищі імітаційного моделювання Matlab/Simulink а також систему станів. При розробці моделі було розібрано метод відслідковування точки максимальної потужності на основі алгоритму інкрементної провідності.

У четвертому розділі «реалізація автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо та розрахунок її параметрів.» розроблений програмний засіб для імітаційного моделювання високоефективної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо є значним кроком у напрямку моделювання екологічного, додаткового джерела живлення, сонячних панелей. Цей інструмент відкриває можливість проводити інтенсивне моделювання, підсилений інноваційними методами відслідковування точки максимальної потужності, яке виявило важливість використання імітаційних засобів при розробці оптимізаційних рішень

для систем які використовують сонячних панелей. Цей програмний засіб дозволяє ефективно моделювати вольт-амперні та вольт-ватні характеристики сонячних панелей, а також відтворює їхню роботу за різних умов експлуатації, зокрема, при різних значеннях інтенсивності сонячного випромінювання та температури. Це надає можливість більш глибоко зрозуміти, як фактори навколишнього середовища впливають на ефективність сонячних панелей.

Використання інструментів імітаційного моделювання є вирішальним етапом у процесі розробки та удосконалення систем альтернативної енергетики. Ці інструменти відіграють ключову роль у виявленні можливостей оптимізації та розумінню реальних показників потужності, сприяючи стабільному та ефективному використанню сонячної енергії. Результати, отримані під час моделювання, підтверджують відповідність значень точки максимальної потужності номінальним умовам експлуатації, що визначено в паспортних даних розглянутого фотоелектричного модуля.

Отримані в ході моделювання значення точки максимальної потужності підтверджують, що фотоелектричний модуль виявляє відмінну відповідність виробничим характеристикам при стандартних умовах експлуатації. Це свідчить про високу достовірність та ефективність розробленого програмного засобу для імітаційного моделювання, який може служити надійною основою для подальших досліджень та навчання.

Представлена в роботі методика розрахунку параметрів та моделювання характеристик сонячних панелей може бути використана при розробці та тестуванні алгоритмів відслідковування точки максимальної потужності.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lund, H. "Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions" // Academic Press, 2014;
2. Masters, G. M. "Renewable and Efficient Electric Power Systems" // Wiley, 2013.
3. Kroposki B., Henry Louie, "Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries" // Springer, 2018.
6. Lacho Pop, Dimi Avram " Off Grid and Mobile Solar Power for Everyone Youre Smart Solar Guide" // Digital Publishing Ltd, 2018.
7. Lacho Pop, Dimi Avram " Off Grid and Mobile Solar Power for Everyone Youre Smart Solar Guide" // Digital Publishing Ltd, 2018.
8. Pauk Y. Y., Tuskaeva Z. R. Solar panels as an alternative source of energy. SCIENTIFIC DEVELOPMENT TRENDS AND EDUCATION. 2019.
9. Renewable energy sources in independent systems of power supply / I. A. Vasil'ev et al. FORESTRY BULLETIN. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 91–97.
10. Nelsen J. Solar Panels: Are Solar Panels Worth It?. Draft2Digital, 2022.
11. PV A., T T A. Home Energy Management and Control System with Renewable Energy Source and Energy Storage System. SSRN Electronic Journal. 2022.
12. Liu Y., Lu Z., Yang F. The investigation of solar PV models. 2018 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington DC, 19–22 February 2018. 2018.
13. Chakraborty, S., Pota, H. R. "Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems: A Sourcebook of Topologies, Control and Integration" // Springer, 2013.
14. User manual. PowMr. URL: <https://powmr.com/pages/powmr-user-manual>.
15. Ortizconde A., Garciasanchez F., Muci J. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated characteristics. *Solar energy materials and solar cells*. 2006. Vol. 90, no. 3. P. 352–361.

16. Mishra S. K. Monitoring of PV Panels and Measurement System for Solar. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2021. Vol. 9, no. VI. P. 2447–2453.
17. Jung Y.-J., Choi J.-H., Ahn S.-J. PV-ESS System Operation Strategy Considering the PV Output Prediction Error. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*. 2017. Vol. 31, no. 2. P. 63.
18. Gosavi A. Solar Panel Fault Detection. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2019. Vol. 7, no. 10. P. 21–23.
19. EVERTS S. MAKING SOLAR PANELS GREENER. *Chemical & Engineering News Archive*. 2011. Vol. 89, no. 8. P. 37–38.
20. Islam B. u., Baharudin Z., Kattel P. Inertia Theory Frequency Dynamic Analysis and Control of Power System with High Proportion of Renewable Source. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–16.
21. Ortizconde A., Garciasanchez F., Muci J. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated characteristics. *Solar energy materials and solar cells*. 2006. Vol. 90, no. 3. P. 352–361.
22. Ahmad Hamdi R. T. Solar cell system simulation using Matlab-Simulink. *Kurdistan Journal of Applied Research*. 2017. Vol. 2, no. 1. P. 45–51.
23. TGA reports 2015 PV statistics for medicines, vaccines. *Reactions Weekly*. 2016. Vol. 1629, no. 1. P. 6.
24. Schmeer G. E., Oman H. A Portable Equatorial Mount for Solar-Testing Large Solar Panels. *IEEE Transactions on Aerospace*. 1965. AS-3, no. 2. P. 67–70.
25. Matlab-Simulink of photovoltaic system based on a two-diode model simulator with shaded solar cells / N. Belhaouas et al. *Journal of Renewable Energies*. 2023. Vol. 16, no. 1.
26. Mulenga E., Bollen M. H. J., Etherden N. Adapted Stochastic PV Hosting Capacity Approach for Electric Vehicle Charging Considering Undervoltage. *Electricity*. 2021. Vol. 2, no. 3. P. 387–402.

27. A software tool for testing maximum power point tracking algorithms using real working conditions / B. Amrouche et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, no. 29. P. 12525–12534.
28. Lakshmi Swarupa M., Vijay Kumar E., Sreelatha K. Modeling and simulation of solar PV modules based inverter in MATLAB-SIMULINK for domestic cooking. *Materials Today: Proceedings*. 2020.
29. da Silva R. M., Fernandes J. L. M. Hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems simulation with Simulink/Matlab. *Solar Energy*. 2010. Vol. 84, no. 12. P. 1985–1996.
30. Ishaque K., Salam Z., Syafaruddin. A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model. *Solar Energy*. 2011. Vol. 85, no. 9. P. 2217–2227.
31. Analysis of Partial Shading Effects of Solar PV Module Configurations Using MATLAB/Simulink / H.-G. Lee et al. *American Journal of Energy Research*. 2018. Vol. 6, no. 1. P. 8–18
32. Modelling and Control of Grid-Connected PV/Fuel Cell/Battery Hybrid Power System / S. G. Tesfahunegn et al. *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*. 2018. Vol. 6, no. 5. P. 168.
33. Abello A. J. A. Power Measurement Model Optimization using MATLAB. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2019. Vol. 8, no. 3. P. 538–543.
34. Efficient performance testing for PV array sets using capacitor charging method / Aryan et al. *Materials Today: Proceedings*. 2023.
35. Power enhanced solar PV array configuration based on calcudoku puzzle pattern for partial shaded PV system / B. Aljafari et al. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, no. 5. P. e16041.
36. Salihmuhsin M., Aldwihi B. A. Matlab/Simulink ile PV Panellerinin Modellenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2019.

37. Mohammad A. T., Al-Sagar Z. S. PV SOLAR PANEL PERFORMANCE IN IRAQ USING MATLAB. Diyala Journal of Engineering Sciences. 2017. Vol. 10, no. 2. P. 86–93.
38. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink. Berkeley, CA : Apress, 2019.
39. Chan J. PV array simulator performance evaluation : thesis. 2011.
40. Технічний паспорт Risen RSM120-8-590 TITAN. e-energy. URL: [https://e-energy.in.ua/solar\\_panels/solnechnaja-panel-risen-rsm120-8-590-titan.html](https://e-energy.in.ua/solar_panels/solnechnaja-panel-risen-rsm120-8-590-titan.html).
41. A simple PV array modeling using MATLAB / M. Arun Bhaskar et al. 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT 2011), Nagercoil, India, 23–24 March 2011. 2011.
42. Serenje C., Freddy T. K. S., Lakshmanan R. Mathematical Modelling of PV Array in Matlab/Simulink with Partial Shading Conditions. 5th IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT2018), Kuala Lumpur, Malaysia. 2018.
43. Tot I. INDUSTRIJSKA IMPLEMENTACIJA MODBUS PROTOKOLA. Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. 2019. Vol. 34, no. 06. P. 1112–1115.
44. Kekre A. M., Kothari A. MODBUS-TR: Advanced MODBUS-RTU Protocol for IoT with Auto-discovery and Triggers. Wireless Personal Communications. 2022.

Додаток А

Стаття у фаховому журналі

УДК 621.383.51

DOI: \_\_\_\_\_

МАРТИНЮК В. В., ФЕДУЛА М. В., СЛИВА А. А.

Хмельницький національний університет

## АНАЛІЗ НЕЛІНІЙНОЇ ЕКСПОНЕНЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

*Розвиток методів аналізу характеристик фотоелектричних модулів вимагає вдосконалення нелінійних експоненційних моделей з метою підвищення точності математичного опису залежностей між напругою та струмом в умовах перехідних процесів. Відомі експоненційні моделі характеризуються похибками в умовах перехідних процесів та неявними формами залежностей між параметрами фотоелектричних модулів, що суттєво знижує їх ефективність в процесі реалізації кіберфізичних систем енергетики, які активно розвиваються протягом останніх років.*

*Основними задачами, які вирішуються в процесі моделювання фотоелектричних модулів є отримання явних залежностей струму від напруги, освітленості та температури, а також формування ефективних числових алгоритмів розрахунку параметрів і характеристик у реальному масштабі часу.*

*У роботі розглянуто особливості нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля із врахуванням послідовного та паралельного паразитних опорів. Сформульована явна залежність струму фотоелектричного модуля від напруги, освітленості та температури. Виконано імітаційне моделювання фотоелектричного модуля на основі числового методу. Отримані результати свідчать про високу точність нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля, та показують наявність похибки, що спричинена перехідними процесами внаслідок зміни зовнішніх умов.*

*Ключові слова: модель, фотоелектричний модуль, нелінійність, експоненційна функція, явна залежність.*

MARTYNYUK V. V., FEDULA M. V., SLYVA A. A.

Khmelnitskyi National University

## The Analysis of Photovoltaic Module Nonlinear Exponential Model

*The development of methods for analyzing the characteristics of photovoltaic modules requires the improvement of nonlinear exponential models in order to improve the accuracy of the mathematical description of the dependences between voltage and current in the conditions of transient processes. The known exponential models are characterized by errors in the conditions of transient processes and implicit forms of dependencies between the parameters of photovoltaic modules, that significantly reduce their effectiveness in the process of implementing cyber-physical energy systems, which are actively developing in recent years.*

*The main tasks, solved in the photovoltaic modules modeling, are obtaining clear dependences of current on voltage, illumination and temperature, as well as the development of effective numerical algorithms for calculating parameters and characteristics on a real time scale.*

*The paper considers the peculiarities of the nonlinear exponential model of the photovoltaic module, taking into account series and parallel parasitic resistances. An explicit dependence of the photovoltaic module current on voltage, illumination and temperature is formulated. Simulation modeling of the photovoltaic module based on the numerical method was performed. The obtained results indicate the high accuracy of the nonlinear exponential model of the photovoltaic module, and show the presence of an error caused by transient processes due to changes in external conditions.*

*Keywords: model, photovoltaic module, nonlinearity, exponential function, explicit dependence.*

### **Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

На даний час сонячна енергетика стала важливою частиною світових енергосистем [1], і її актуальність зростає з кожним роком у контексті стрімкого розвитку альтернативних джерел енергії та розумних мереж [2]. Фотоелектричні модулі, як основний елемент сонячних панелей, виконують перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Одним з актуальних завдань сучасної сонячної енергетики є підвищення ефективності фотоелектричних модулів та зменшення витрат на їх виробництво. У цьому контексті моделювання надає можливість детального аналізу характеристик структур та матеріалів, що використовуються в фотоелектричних модулях, з метою збільшення відбору сонячної енергії та зниження втрат при її перетворенні в електричну енергію. Аналітичні та числові методи моделювання фотоелектричних елементів на основі експоненційних функцій дозволяють прогнозувати та вдосконалювати роботу сонячних модулів у змінних умовах навколишнього середовища, і дають можливість покращувати співвідношення між витратами та показниками ефективності роботи сонячних електростанцій [3,4].

Застосування сучасних технологій у моделюванні фотоелектричних модулів дає можливість підвищити точність та швидкість розрахунків, формувати прогнози для нових типів фотоелектричних модулів, а також враховувати вплив різних зовнішніх факторів на їх роботу. Моделювання сонячних електростанцій та вузлів електроенергетичних мереж дозволяє оптимізувати ефективність та стабільність енергетичної системи в цілому. Завдяки практичному впровадженню результатів моделювання фотоелектричних модулів в умовах технологій Industry 4.0 процеси виготовлення і вдосконалення матеріалів та пристроїв сонячної енергетики значно прискорюються [5,6]. Використання кіберфізичних систем та цифрових двійників дозволяє формувати набагато більш ефективні системи сонячної енергетики, у яких втрати енергії мінімізуються за рахунок автоматизованого налаштування режимів роботи за результатами прогнозування динаміки струму та напруги фотоелектричних модулів на основі їх моделей, параметри яких розраховуються у реальному часі [5].

При впровадженні енергетичних технологій на основі моделювання важливим є баланс між точністю моделей та вимогами до обчислювального ресурсу, необхідного для забезпечення режиму реального часу. Таким чином, аналіз і вдосконалення моделей фотоелектричних модулів є актуальним завданням сучасної сонячної енергетики, від вирішення якого залежать показники ефективності роботи розумних мереж на основі відновлюваних джерел енергії.

### **Формулювання цілей статті**

**Метою роботи** є аналіз параметрів та формулювання рекомендацій для підвищення точності нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Відомі методи моделювання сонячних фотоелектричних модулів включають велику кількість різних підходів та програмних засобів для аналізу та прогнозування динаміки залежностей між їх струмом та напругою за різних погодних умов. Одним із поширених підходів до моделювання фотоелектричних модулів є застосування експоненційних функцій, які забезпечують гнучкість та точність при аналізі нелінійних процесів, що відбуваються у фотоелектричних елементах [4,7,8].

Найчастіше експоненційні функції використовуються у моделюванні температурних залежностей фотоелектричних модулів [9]. Такі моделі враховують вплив температури на електричні характеристики модулів при різних напругах і струмах. Залежність втрат потужності та ефективності від температури, що може бути апроксимована експоненційними функціями, дозволяє з високою точністю враховувати зміни в роботі фотоелектричних модулів за різних погодних умов. Крім того, експоненційні функції використовуються для моделювання залежностей струму від напруги та характеристик діаграм спрямованості сонячних панелей [5]. Нелінійні експоненційні моделі також широко застосовуються для аналізу впливу рівня сонячної освітленості на ефективність фотоелектричних модулів [10,11]. Моделювання залежностей генерації струму від інтенсивності світла та температури дозволяє точно визначати ефективність модулів у різних умовах експлуатації.

Аналітичні методи моделювання [12,13] базуються на математичному аналізі рівнянь, що описують залежності між параметрами фотоелектричних модулів при різних характеристиках зовнішніх впливів. Більшість відомих аналітичних методів моделювання фотоелектричних модулів використовують експоненційні функції для розрахунку залежності між струмом та напругою фотоелектричного модуля на основі теорії напівпровідників. У методах двофазної дифузії використовуються дифузійні рівняння для опису процесів електронного перенесення у фотоелектричному матеріалі [13–15]. Слід зазначити, що при використанні аналітичних методів моделі фотоелектричних модулів часто можуть мати форму неявних залежностей між струмом, напругою та іншими параметрами, що суттєво ускладнює процес розрахунку та підвищує вимоги до обчислювальних ресурсів [16,17].

До числових методів моделювання фотоелектричних модулів відносяться метод скінченних різниць [18] та метод скінченних елементів [19]. Метод скінченних різниць використовується для розв'язування диференціальних рівнянь, якими описуються фотоелектричні модулі, на основі алгоритмів числового інтегрування [20]. Метод скінченних елементів використовується для моделювання просторового розподілу температури, напруги та струму в фотоелектричних модулях [19,21].

Числові методи моделювання фотоелектричних модулів характеризуються значно вищою швидкістю, ніж аналітичні та можуть використовуватися для вбудовування моделей фотоелектричних модулів у кіберфізичні системи. Проте, алгоритми моделювання на базі числових методів характеризуються похибками дискретизації та ефектами квантування, що можуть призводити до виникнення нестабільних режимів виконання обчислень. Тому на даний час актуальним є розроблення та вдосконалення числових методів моделювання фотоелектричних модулів з метою отримання вищої стабільності та стійкості до похибок дискретизації [22].

Методи оптимізації використовуються у моделюванні фотоелектричних модулів для знаходження параметрів, які найкраще відповідають вимірним показникам. Разом із відомими методами лінійного та нелінійного програмування, значного поширення набувають також методи на основі генетичних алгоритмів (теорія еволюційного числення) та методи моделювання з використанням нейронних мереж [23–25].

Методи оптимізації дозволяють отримати надзвичайно високу точність апроксимації характеристик фотоелектричних модулів. Проте, слід зазначити, що швидкі алгоритми прогнозування динаміки фотоелектричних модулів у реальному часі розвинені недостатньо, і вимагають подальших досліджень у контексті розвитку технологій штучного інтелекту [25].

При наявності значних обчислювальних ресурсів можуть використовуватися також методи системного аналізу, у яких детально моделюється і аналізується взаємодія фотоелектричних модулів з іншими компонентами сонячної енергетичної системи [25,26]. Такі методи мають значні перспективи застосування у кіберфізичних системах розумних мереж, проте вони вимагають високої точності та швидкодії моделювання багатьох компонентів різної фізичної природи.

Таким чином, аналіз нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля є необхідним завданням для формулювання умов розробки і вдосконалення методів та алгоритмів моделювання систем сонячної енергетики в умовах розвитку технологій розумних мереж.

### Математична модель фотоелектричного модуля

Еквівалентна схема фотоелектричного елемента зображена на рис. 1.

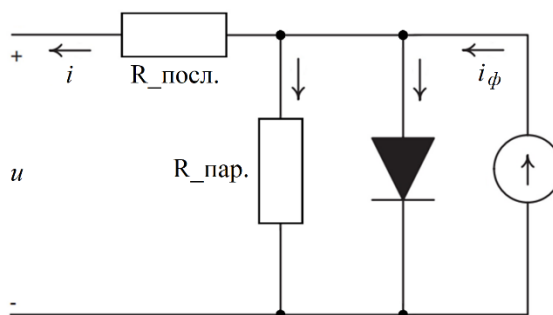


Рис. 1 Еквівалентна схема фотоелектричного елемента

Еквівалентна схема заміщення фотоелектричного елемента (рис. 1) складається з джерела фотоструму, послідовного і паралельного опорів, а також діода, модель якого визначає нелінійність вольт-амперної характеристики.

Сила струму фотоелектричного модуля описується формулою (1):

$$i = N_{\text{пар.}} i_{\text{ф}} - \frac{u N_{\text{пар.}} + i R_{\text{посл.}} N_{\text{посл.}}}{R_{\text{пар.}} N_{\text{посл.}}} - N_{\text{пар.}} i_{\text{н}} \left( e^{\frac{q(u N_{\text{пар.}} + i R_{\text{посл.}} N_{\text{посл.}})}{N_{\text{пар.}} N_{\text{посл.}} n k T}} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $i$  – струм фотоелектричного модуля,  $u$  – напруга фотоелектричного модуля,  $i_{\text{ф}}$  – фотострум,  $i_{\text{н}}$  – струм насичення,  $N_{\text{пар.}}$  – кількість паралельно з'єднаних фотоелектричних елементів,  $N_{\text{посл.}}$  – кількість послідовно з'єднаних фотоелектричних елементів,  $R_{\text{посл.}}$  – еквівалентний послідовний опір,  $R_{\text{пар.}}$  – еквівалентний паралельний опір,  $q$  – заряд одного електрона,  $q = 1,602 \times 10^{-19}$  Кл,  $k$  – стала Больцмана,  $k = 1,3806503 \times 10^{-23}$  Дж/К,  $n$  – коефіцієнт ідеальності,  $T$  – температура фотоелектричних елементів ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Фотострум визначається виразом (2):

$$i_{\text{ф}} = \frac{G i_{\text{ф,н.у.}} (1 + k_i (T - T_{\text{н.у.}}))}{G_{\text{н.у.}}}, \quad (2)$$

де  $G$  – рівень освітленості ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $T$  – температура ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $k_i$  – відносний температурний коефіцієнт струму короткого замикання,  $i_{\text{ф,н.у.}}$  – фотострум за нормальних умов при освітленості  $G_{\text{н.у.}} = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  та температурі  $T_{\text{н.у.}} = 25^{\circ}\text{C}$ .

Струм насичення визначається температурною залежністю (3):

$$i_n = i_{0,n,y} \left( \frac{T}{T_{n,y}} \right)^3 e^{\frac{E_{G,n,y} - E_G}{kT_{n,y}}}, \quad (3)$$

де  $i_{0,n,y}$  – струм насичення за нормальних умов,  $E_{G,n,y}$  – ширина забороненої зони напівпровідника за нормальних умов (eВ),  $E_G$  – ширина забороненої зони (eВ), яка визначається залежністю (4):

$$E_G = 1.16 - 7.02 * 10^{-4} \left( \frac{T^2}{T-1108} \right), \quad (4)$$

де  $T$  – температура фотоелектричних елементів.

Внаслідок наявності захисного покриття фотоелектричного модуля, температура фотоелектричних елементів  $T$  відрізняється від зовнішньої температури  $T_{зovн.}$ , та визначається виразом (5):

$$T = GT_{зovн.} \left( \frac{T_{ном.} - 20}{0.8} \right), \quad (5)$$

де  $T_{ном.}$  – номінальна температура фотоелектричного модуля, згідно із його технічною документацією.

Для спрощення подальших перетворень введемо додаткову змінну  $x$ :

$$x = \frac{uN_{пар.} + iR_{пocл.}N_{пocл.}}{R_{пар.}N_{пocл.}} = u \frac{N_{пар.}}{R_{пар.}N_{пocл.}} + i \frac{R_{пocл.}}{R_{пар.}}. \quad (6)$$

Тоді силу струму фотоелектричного модуля можна виразити за формулою (7):

$$i = x \frac{R_{пар.}}{R_{пocл.}} - u \frac{N_{пар.}}{R_{пocл.}N_{пocл.}}. \quad (7)$$

Підставимо додаткову змінну  $x$  у рівняння (1):

$$x \frac{R_{пар.}}{R_{пocл.}} - u \frac{N_{пар.}}{R_{пocл.}N_{пocл.}} = N_{пар.}i_{\phi} - x - N_{пар.}i_n \left( e^{\frac{qR_{пар.}}{N_{пар.}nkT}x} - 1 \right). \quad (8)$$

Далі, для зручності подамо вираз (8) у формі (9):

$$N_{пар.}i_n e^{\frac{qR_{пар.}}{N_{пар.}nkT}x} + \left( 1 + \frac{R_{пар.}}{R_{пocл.}} \right) x - \left( N_{пар.} (i_n + i_{\phi}) + u \frac{N_{пар.}}{R_{пocл.}N_{пocл.}} \right) = 0. \quad (9)$$

Далі виконуємо заміну, і вводимо додаткові параметри  $a, b, c, d$ .

$$a = N_{пар.}i_n, \quad b = \frac{qR_{пар.}}{N_{пар.}nkT}, \quad c = 1 + \frac{R_{пар.}}{R_{пocл.}}, \quad d = - \left( N_{пар.} (i_n + i_{\phi}) + u \frac{N_{пар.}}{R_{пocл.}N_{пocл.}} \right). \quad (10)$$

Тоді рівняння (9) набуде вигляду (11):

$$ae^{bx} + cx + d = 0. \quad (11)$$

Розв'яжемо рівняння (11) відносно змінної  $x$ :

$$x = -\frac{1}{b} W \left( \frac{abe^{-\frac{bd}{c}}}{c} \right) - \frac{d}{c}, \quad (12)$$

де  $W(\dots)$  – W-функція Ламберта.

Тоді сила струму фотоелектричного модуля визначається шляхом підстановки виразу (12) у вираз (7):

$$i = -\frac{R_{пар.}}{bR_{пocл.}} W \left( \frac{abe^{-\frac{bd}{c}}}{c} \right) - \frac{dR_{пар.}}{cR_{пocл.}} - u \frac{N_{пар.}}{R_{пocл.}N_{пocл.}}. \quad (13)$$

Таким чином, вираз (13) є математичною моделлю, яка описує залежність струму фотоелектричного модуля від його напруги, рівня освітленості та температури.

### Імітаційне моделювання фотоелектричного модуля

Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання фотоелектричного модуля зображена на рис. 2.



Рис. 2 Блок-схема алгоритму роботи

Для моделювання спочатку вводяться технічні параметри фотоелектричного модуля. Зчитування значень параметрів може виконуватися у реальному масштабі часу із датчиків за протоколом modbus. Якщо отримані дані коректні (немає грубих помилок), то далі відбувається їх передача до імітаційної моделі та розрахунок значень вихідного струму фотоелектричного модуля. Виконується розрахунок потужності та передача отриманих показників для візуального відображення у формі графіків. Розраховані та виміряні показники записуються у файл для подальшого аналізу.

У розробленій імітаційній моделі фотострум розрахунок фотоструму виконується за схемою, зображеною на рис. 3.

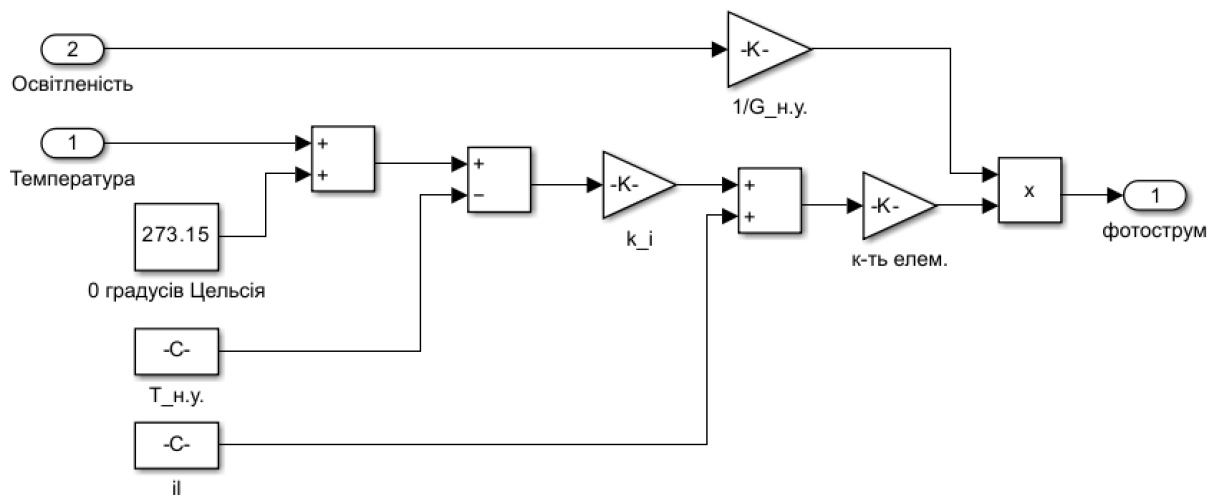


Рис. 3 Блок-схема для розрахунку фотоструму

На рис. 3 зображена блок-схема для розрахунку еквівалентного фотоструму модуля, що формується джерелом, зображеним на рис.1. Фотострум визначається із врахуванням рівня освітленості та температури, згідно із формулою (2). Виміряна температура переводиться у градуси Кельвіна, та враховується абсолютна температура нормальних умов.

Еквівалентний струм діода розраховується за схемою, зображеною на рис. 4.

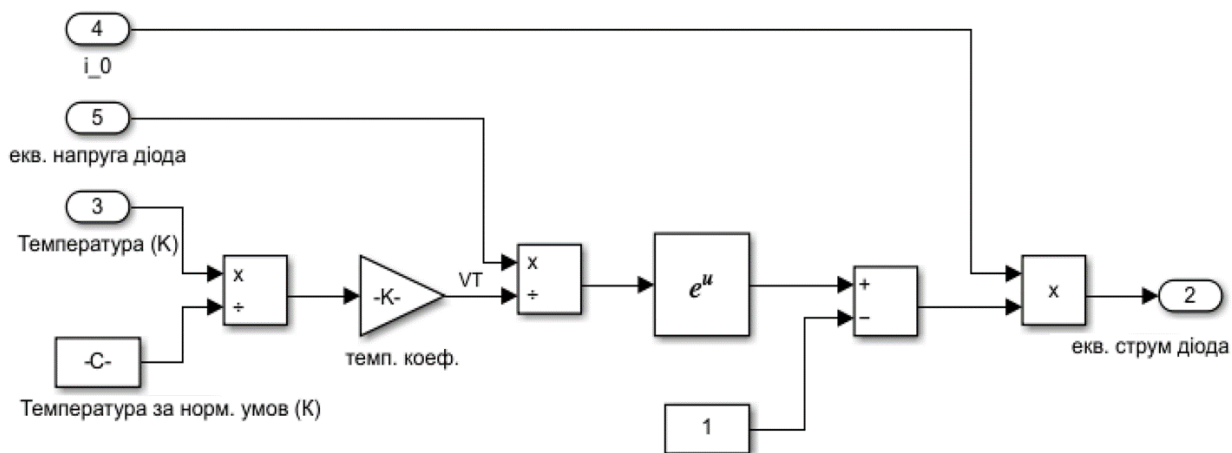


Рис. 4 Блок-схема для розрахунку еквівалентного струму діода

Еквівалентний струм діода розраховується ітеративно, за допомогою експоненційної функції, на вхід якої подається величина, що залежить від температури та напруги і струму з метою врахування впливу джерела фотоструму та елементів зовнішнього електричного кола, серед яких можуть бути присутні також інші джерела електричної енергії.

Розрахунок струму на контактах фотоелектричного модуля виконується відповідно до рис. 5.

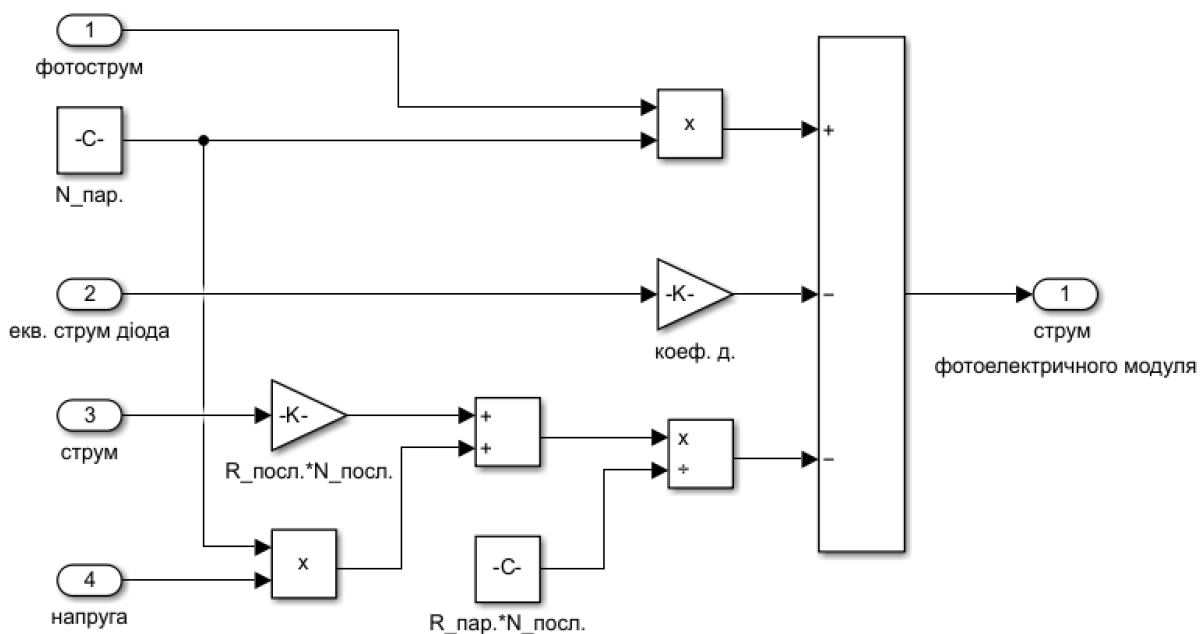
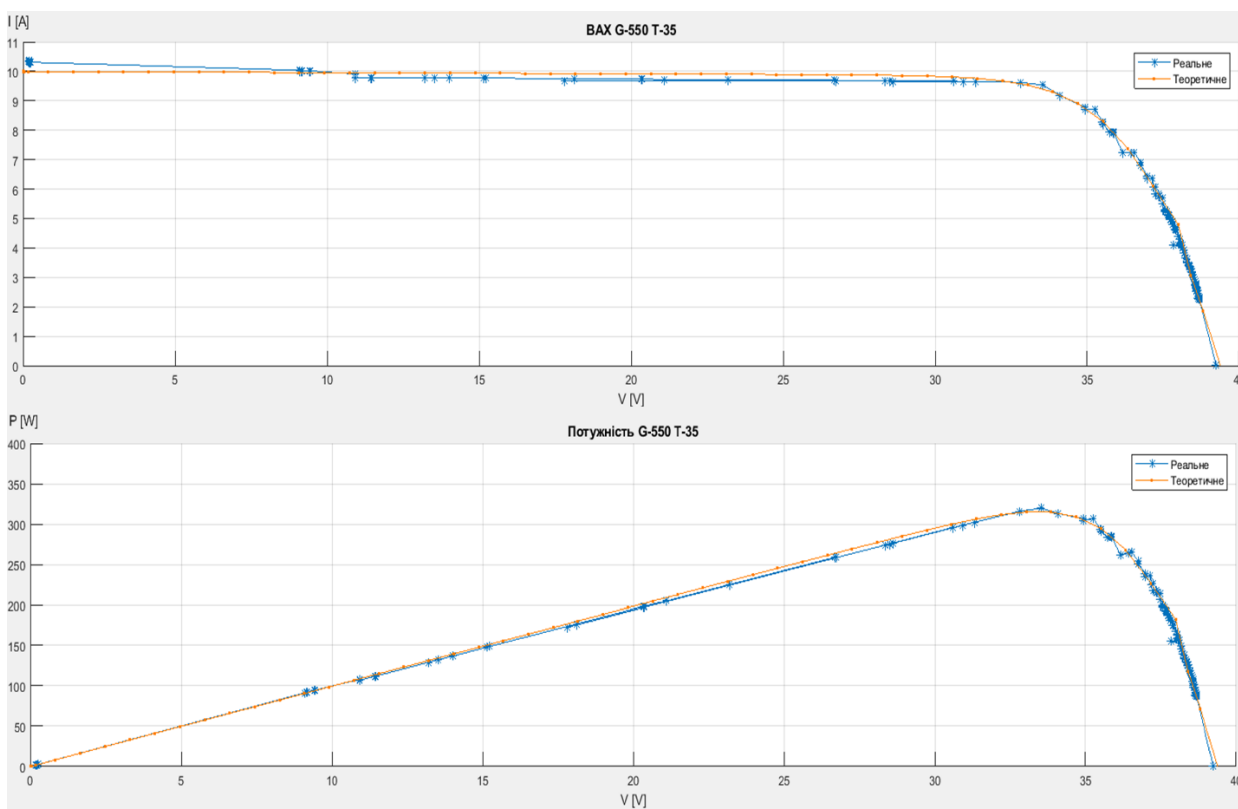


Рис. 5 Блок-схема для розрахунку струму фотоелектричного модуля

На рис. 5 зображена схема розрахунку струму фотоелектричного модуля із врахуванням фотоструму, еквівалентного струму діода та умов зовнішнього електричного кола для заданої кількості фотоелектричних елементів модуля, що можуть приєднуватися паралельно та послідовно.

Результати моделювання фотоелектричного модуля RSM120-8-590BMDG зображено на рис. 6.



**Рис. 6** Порівняння результатів моделювання сонячної панелі з реальними даними експерименту при освітленості  $550 \text{ Вт/м}^2$  та температурі  $35^\circ\text{C}$

На рис. 6 синьою лінією зображено виміряні вольт-амперну та вольт-ватну характеристики фотоелектричного модуля RSM120-8-590BMDG. Непрервною оранжевою лінією зображено вольт-амперну та вольт-ватну характеристики, отримані шляхом моделювання на основі виміряних значень освітленості та температури. З рис. 6 видно, що експериментальна та теоретична характеристики співпадають в усьому діапазоні виміряних значень струму і напруги. Незначне розходження графіків сили струму пояснюється інерційністю зміни параметрів фотоелектричного модуля при змінах освітленості, температури та напруги зовнішнього кола.

Таким чином, графіки, зображені на рис. 6, доводять ефективність застосування нелінійних експоненційних моделей для опису характеристик фотоелектричних модулів, але також вказують на необхідність розвитку ітеративних алгоритмів моделювання динаміки процесів, які характеризуються інерційністю внаслідок наявності паразитних ємностей та індуктивностей, а також ефектів гістерезису нелінійних елементів.

#### **Висновки з проведеного дослідження і перспективи подальшої роботи**

Проведені теоретичні дослідження та експерименти свідчать про суттєві переваги використання нелінійної експоненційної моделі для опису фотоелектричного модуля. Модель забезпечує достатньо високу точність при відтворенні складної залежності між параметрами модуля і змінними величинами рівня освітленості та температури. Експоненційна модель дозволяє враховувати нелінійні ефекти в процесі роботи фотоелектричного модуля, що є важливим у реальних умовах експлуатації. Враховуючи нелінійність характеристик сонячних панелей, такі як втрати потужності при зміні температури та навантаження, нелінійна експоненційна модель дозволяє отримувати достатньо точні прогнози виробництва електроенергії. Вказаний підхід також є корисним для оптимізації роботи фотоелектричних систем з метою забезпечення максимального збору енергії. Його застосування дозволяє здійснювати більш глибокий аналіз та планування експлуатації сонячних електростанцій із врахуванням реальних умов експлуатації та факторів, що впливають на роботу фотоелектричних модулів при різних погодних умовах.

Нелінійна експоненційна модель показує достатньо високу точність апроксимації вольт-амперної та вольт-ватної характеристик фотоелектричного модуля в умовах повільних змін освітленості та температури та характеристик навантаження. Проте, у випадках, коли швидкі перехідні процеси відбуваються за декількома параметрами одночасно, точність нелінійної експоненційної моделі може знижуватися внаслідок наявності різних типів інерції фотоелектричного модуля (ефекти пам'яті паразитних ємностей та індуктивностей, а також гістерезис нелінійних елементів).

З метою підвищення точності моделювання фотоелектричних модулів у режимах із швидкими перехідними процесами необхідним є вдосконалення моделей пам'яті лінійних та нелінійних елементів для синтезу алгоритмів швидких перетворень, необхідних для роботи кіберфізичних систем у реальному часі.

#### **Література**

- [1] Maka AOM, Alabid JM. Solar energy technology and its roles in sustainable development. *Clean Energy* 2022;6. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>.
- [2] Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renew Energy* 2020;146:2589–625. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.08.092>.
- [3] Deihimi MH, Naghizadeh RA, Meyabadi AF. Systematic derivation of parameters of one exponential model for photovoltaic modules using numerical information of data sheet. *Renew Energy* 2016;87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.066>.
- [4] Murtaza AF, Munir U, Chiaberge M, Di Leo P, Spertino F. Variable parameters for a single exponential model of photovoltaic modules in crystalline-silicon. *Energies (Basel)* 2018;11. <https://doi.org/10.3390/en11082138>.
- [5] Patra B, Nema P, Khan MZ, Khan O. Optimization of solar energy using MPPT techniques and industry 4.0 modelling. *Sustainable Operations and Computers* 2023;4. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.10.001>.
- [6] Mastrocinque E, Ramírez FJ, Honrubia-Escribano A, Pham DT. Industry 4.0 enabling sustainable supply chain development in the renewable energy sector: A multi-criteria intelligent approach. *Technol Forecast Soc Change* 2022;182. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121813>.
- [7] De Falco P, Di Noia LP, Rizzo R. Exponential Smoothing Model for Photovoltaic Power Forecasting. *Proceedings of 2021 9th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2021, 2021*. <https://doi.org/10.1109/MPS52805.2021.9492538>.
- [8] Martynyuk V, Fedula M, Petrus R, Makaryshkin D, Kovtun L. Solar Cell data acquisition system. *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2019 2019;1:140–5*. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924386>.
- [9] Xu HY, Zhang Q. Photovoltaic Power Generation Prediction Technology based on Digital Twin and Improved LSTM. *Reneng Dongli Gongcheng/Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* 2023;38. <https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.02.012>.
- [10] Fernández EF, Ferrer-Rodríguez JP, Almonacid F, Pérez-Higueras P. Current-voltage dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels. *Solar Energy* 2017;155. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.012>.
- [11] Dev S, Alskaf T, Hossari M, Godina R, Louwen A, Van Sark W. Solar irradiance forecasting using triple exponential smoothing. *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, SEST 2018 - Proceedings, 2018*. <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495816>.
- [12] Lindig S, Kaaya I, Weis KA, Moser D, Topic M. Review of statistical and analytical degradation models for photovoltaic modules and systems as well as related improvements. *IEEE J Photovolt* 2018;8. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2870532>.
- [13] Monteiro C, Fernandez-Jimenez LA, Ramirez-Rosado IJ, Muñoz-Jimenez A, Lara-Santillan PM. Short-term forecasting models for photovoltaic plants: Analytical versus soft-computing techniques. *Math Probl Eng* 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/767284>.
- [14] dos Santos LLC, Canha LN, Bernardon DP. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. *Renew Energy* 2018;116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.088>.
- [15] Alhousni FK, Alnaimi FBI, Okonkwo PC, Ben Belgacem I, Mohamed H, Barhoumi EM. Photovoltaic Power Prediction Using Analytical Models and Homer-Pro: Investigation of Results Reliability. *Sustainability (Switzerland)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/su15118904>.
- [16] Pérez Archila LM, Bastidas Rodríguez JD, Correa R. Implicit modelling of series-parallel photovoltaic arrays using double-diode model and its solution. *Solar Energy* 2021;214. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.036>.
- [17] Archila LMP, Bastidas-Rodríguez JD, Correa R, Grisales LAT, Gonzalez-Montoya D. A solution of implicit model of series-parallel photovoltaic arrays by using deterministic and metaheuristic global optimization algorithms. *Energies (Basel)* 2020;13. <https://doi.org/10.3390/en13040801>.
- [18] Auzinger W, Pukach P, Stolyarchuk R, Vovk M. Adaptive Numerics for Linear ODE Systems with Time-Dependent Data; Application in Photovoltaics. *International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, 2020*. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109442>.
- [19] Boulfaf N, Ait Laasri EH, Hamid N, Elyaqouti M, Ghafiri A, Chaoufi J. Modelling and simulation of a photovoltaic module using finite element method: transient analysis. *International Journal of Ambient Energy* 2023;44. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2173650>.
- [20] Chouchen B, Gazzah MH, Bajahzar A, Belmabrouk H. Numerical modeling of the electronic and electrical characteristics of InGaN/GaN-MQW solar cells. *Materials* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/ma12081241>.
- [21] Springer M, Bosco N. On Residual Stresses and Reference Temperatures in Thermomechanical Simulations of Photovoltaic Modules Using the Finite Element Method. *IEEE J Photovolt* 2022;12. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3143458>.
- [22] Wang Y, Qi Y, Li J, Huan L, Li Y, Xie B, et al. The Wind and Photovoltaic Power Forecasting Method Based on Digital Twins. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023;13. <https://doi.org/10.3390/app13148374>.
- [23] Liang J, Qiao K, Yuan M, Yu K, Qu B, Ge S, et al. Evolutionary multi-task optimization for parameters extraction of photovoltaic models. *Energy Convers Manag* 2020;207. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112509>.
- [24] Campana PE, Landelius T, Andersson S, Lundström L, Nordlander E, He T, et al. A gridded optimization model for photovoltaic applications. *Solar Energy* 2020;202. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.076>.
- [25] Zhang G, Wang X. Digital twin modeling for photovoltaic panels based on hybrid neural network. *Proceedings 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence, DTPI 2021, 2021*. <https://doi.org/10.1109/DTPI52967.2021.9540210>.

- [26] Cervera-Gascó J, Montero J, Del Castillo A, Tarjuelo JM, Moreno MA. EVASOR, an integrated model to manage complex irrigation systems energized by photovoltaic generators. *Agronomy* 2020;10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030331>.

### References

- [1] Maka AOM, Alabid JM. Solar energy technology and its roles in sustainable development. *Clean Energy* 2022;6. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>.
- [2] Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renew Energy* 2020;146:2589–625. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.08.092>.
- [3] Deihimi MH, Naghizadeh RA, Meyabadi AF. Systematic derivation of parameters of one exponential model for photovoltaic modules using numerical information of data sheet. *Renew Energy* 2016;87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.066>.
- [4] Murtaza AF, Munir U, Chiaberge M, Di Leo P, Spertino F. Variable parameters for a single exponential model of photovoltaic modules in crystalline-silicon. *Energies (Basel)* 2018;11. <https://doi.org/10.3390/en11082138>.
- [5] Patra B, Nema P, Khan MZ, Khan O. Optimization of solar energy using MPPT techniques and industry 4.0 modelling. *Sustainable Operations and Computers* 2023;4. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.10.001>.
- [6] Mastrocinque E, Ramírez FJ, Honrubia-Escribano A, Pham DT. Industry 4.0 enabling sustainable supply chain development in the renewable energy sector: A multi-criteria intelligent approach. *Technol Forecast Soc Change* 2022;182. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121813>.
- [7] De Falco P, Di Noia LP, Rizzo R. Exponential Smoothing Model for Photovoltaic Power Forecasting. *Proceedings of 2021 9th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2021, 2021*. <https://doi.org/10.1109/MPS52805.2021.9492538>.
- [8] Martynyuk V, Fedula M, Petrus R, Makaryshkin D, Kovtun L. Solar Cell data acquisition system. *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2019 2019;1:140–5*. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924386>.
- [9] Xu HY, Zhang Q. Photovoltaic Power Generation Prediction Technology based on Digital Twin and Improved LSTM. *Reneng Dongli Gongcheng/Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* 2023;38. <https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.02.012>.
- [10] Fernández EF, Ferrer-Rodríguez JP, Almonacid F, Pérez-Higueras P. Current-voltage dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels. *Solar Energy* 2017;155. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.012>.
- [11] Dev S, Alskaf T, Hossari M, Godina R, Louwen A, Van Sark W. Solar irradiance forecasting using triple exponential smoothing. *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, SEST 2018 - Proceedings, 2018*. <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495816>.
- [12] Lindig S, Kaaya I, Weis KA, Moser D, Topic M. Review of statistical and analytical degradation models for photovoltaic modules and systems as well as related improvements. *IEEE J Photovolt* 2018;8. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2870532>.
- [13] Monteiro C, Fernandez-Jimenez LA, Ramirez-Rosado IJ, Muñoz-Jimenez A, Lara-Santillan PM. Short-term forecasting models for photovoltaic plants: Analytical versus soft-computing techniques. *Math Probl Eng* 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/767284>.
- [14] dos Santos LLC, Canha LN, Bernardon DP. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. *Renew Energy* 2018;116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.088>.
- [15] Alhousni FK, Alnaimi FBI, Okonkwo PC, Ben Belgacem I, Mohamed H, Barhoumi EM. Photovoltaic Power Prediction Using Analytical Models and Homer-Pro: Investigation of Results Reliability. *Sustainability (Switzerland)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/su15118904>.
- [16] Pérez Archila LM, Bastidas Rodríguez JD, Correa R. Implicit modelling of series-parallel photovoltaic arrays using double-diode model and its solution. *Solar Energy* 2021;214. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.036>.
- [17] Archila LMP, Bastidas-Rodríguez JD, Correa R, Grisales LAT, Gonzalez-Montoya D. A solution of implicit model of series-parallel photovoltaic arrays by using deterministic and metaheuristic global optimization algorithms. *Energies (Basel)* 2020;13. <https://doi.org/10.3390/en13040801>.
- [18] Auzinger W, Pukach P, Stolyarchuk R, Vovk M. Adaptive Numerics for Linear ODE Systems with Time-Dependent Data; Application in Photovoltaics. *International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, 2020*. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109442>.
- [19] Boulfaf N, Ait Laasri EH, Hamid N, Elyaqouti M, Ghafiri A, Chaoufi J. Modelling and simulation of a photovoltaic module using finite element method: transient analysis. *International Journal of Ambient Energy* 2023;44. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2173650>.
- [20] Chouchen B, Gazzah MH, Bajahzar A, Belmabrouk H. Numerical modeling of the electronic and electrical characteristics of InGaN/GaN-MQW solar cells. *Materials* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/ma12081241>.
- [21] Springer M, Bosco N. On Residual Stresses and Reference Temperatures in Thermomechanical Simulations of Photovoltaic Modules Using the Finite Element Method. *IEEE J Photovolt* 2022;12. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3143458>.
- [22] Wang Y, Qi Y, Li J, Huan L, Li Y, Xie B, et al. The Wind and Photovoltaic Power Forecasting Method Based on Digital Twins. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023;13. <https://doi.org/10.3390/app13148374>.
- [23] Liang J, Qiao K, Yuan M, Yu K, Qu B, Ge S, et al. Evolutionary multi-task optimization for parameters extraction of photovoltaic models. *Energy Convers Manag* 2020;207. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112509>.
- [24] Campana PE, Landelius T, Andersson S, Lundström L, Nordlander E, He T, et al. A gridded optimization model for

- photovoltaic applications. *Solar Energy* 2020;202. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.076>.
- [25] Zhang G, Wang X. Digital twin modeling for photovoltaic panels based on hybrid neural network. *Proceedings 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence, DTPI 2021, 2021.* <https://doi.org/10.1109/DTPI52967.2021.9540210>.
- [26] Cervera-Gascó J, Montero J, Del Castillo A, Tarjuelo JM, Moreno MA. EVASOR, an integrated model to manage complex irrigation systems energized by photovoltaic generators. *Agronomy* 2020;10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030331>.

## Додаток Б

### Код програми

```

function Y = modbus_read_3(u)
    if u==1
        modb_obj=evalin('base','modb_obj');
        serverId_1=evalin('base','serverId_1');
        serverId_2=evalin('base','serverId_2');
        serverId_3=evalin('base','serverId_3');
        serverId_4=evalin('base','serverId_4');
        %Освітленість
        E1 = read(modb_obj, 'holdingregs', 1, 1, serverId_1, 'uint16');
        assignin('base','E1',E1);
        pause(0.05)
        %Температура:
        E2 = read(modb_obj, 'holdingregs', 1, 1, serverId_2, 'uint16');
        assignin('base','E2',E2);
        pause(0.05)

        % Напруга:
        E3_1 = read(modb_obj, 'inputregs', 1, 1, serverId_3, 'uint16');
        assignin('base','E3_1',E3_1);
        pause(0.05)
        % Струм:
        E3_2 = read(modb_obj, 'inputregs', 2, 1, serverId_3, 'uint16');
        assignin('base','E3_2',E3_2);
        pause(0.05)

        % Напруга акумулятора:
        E4_1 = 0.1*read(modb_obj, 'holdingregs', 258, 1, serverId_4, 'uint16');
        assignin('base','E4_1',E4_1);
        pause(0.05)
        % Струм акумулятора:
        E4_2 = 0.01*read(modb_obj, 'holdingregs', 259, 1, serverId_4, 'uint16');
        assignin('base','E4_2',E4_2);
        pause(0.05)
        %

        % Напруга навантаження:
    
```

```

E4_3 = 0.1*read(modb_obj, 'holdingregs', 261, 1, serverId_4, 'uint16');
assignin('base','E4_3',E4_3);
pause(0.05)
% Струм навантаження:
E4_4 = 0.01*read(modb_obj, 'holdingregs', 262, 1, serverId_4, 'uint16');
assignin('base','E4_4',E4_4);
pause(0.05)
% Потужність навантаження:
E4_5 = read(modb_obj, 'holdingregs', 263, 1, serverId_4, 'uint16');
assignin('base','E4_5',E4_5);
pause(0.05)
%

% Напруга PV:
E4_6 = 0.1*read(modb_obj, 'holdingregs', 264 , 1, serverId_4, 'uint16');
assignin('base','E4_6',E4_6);
pause(0.05)
% Струм PV:
E4_7 = 0.01*read(modb_obj, 'holdingregs', 265, 1, serverId_4, 'uint16');
assignin('base','E4_7',E4_7);
pause(0.05)
% Потужність PV:
E4_8 = read(modb_obj, 'holdingregs', 266, 1, serverId_4, 'uint16');
assignin('base','E4_8',E4_8);
pause(0.05)

% Загальна спожита потужність:
E4_9 = read(modb_obj, 'holdingregs', 285 , 1, serverId_4, 'uint16');
assignin('base','E4_9',E4_9);
pause(0.05)
% :
E4_10 = read(modb_obj, 'holdingregs', 286, 1, serverId_4, 'uint16');
assignin('base','E4_10',E4_10);
pause(0.05)

Y=1;
end
end
function X1 = workspace_read_1(u)
    if u==1

```

```
        X1=evalin('base','E1');
    end
end
function X2 = workspace_read_2(u)
    if u==1
        X2=evalin('base','E2');
    end
end
function X3 = workspace_read_3_1(u)
    if u==1
        X3=evalin('base','E3_1');
    end
end
function X4 = workspace_read_3_2(u)
    if u==1
        X4=evalin('base','E3_2');
    end
end
function X1 = workspace_read_4_1(u)
    if u==1
        X1=evalin('base','E4_1');
    end
end
function X1 = workspace_read_4_2(u)
    if u==1
        X1=evalin('base','E4_2');
    end
end
function X1 = workspace_read_4_3(u)
    if u==1
        X1=evalin('base','E4_3');
    end
end
function X1 = workspace_read_4_4(u)
    if u==1
        X1=evalin('base','E4_4');
    end
end
function X1 = workspace_read_4_5(u)
    if u==1
        X1=evalin('base','E4_5');
```

```

        end
    end
function X1 = workspace_read_4_6(u)
    if u==1
        X1=evalin('base','E4_6');
    end
end
%Освітленість:
E1 = read(modb_obj, 'holdingregs', 1, 1, serverId_1, 'uint16');
%Температура:
E2 = read(modb_obj, 'holdingregs', 1, 1, serverId_2, 'uint16');
% Напруга:
E3_1 = read(modb_obj, 'inputregs', 1, 1, serverId_3, 'uint16');
% Струм:
E3_2 = read(modb_obj, 'inputregs', 2, 1, serverId_3, 'uint16');
% Напруга акумулятора:
E4_1 = 0.1*read(modb_obj, 'holdingregs', 258, 1, serverId_4, 'uint16');
% Струм батареї:
E4_2 = 0.01*read(modb_obj, 'holdingregs', 259, 1, serverId_4, 'uint16');
% Напруга навантаження:
E4_3 = 0.1*read(modb_obj, 'holdingregs', 261, 1, serverId_4, 'uint16');
% Струм навантаження:
E4_4 = 0.01*read(modb_obj, 'holdingregs', 262, 1, serverId_4, 'uint16');
% Потужність навантаження:
E4_5 = read(modb_obj, 'holdingregs', 263, 1, serverId_4, 'uint16');
% Напруга PV:
E4_6 = 0.1*read(modb_obj, 'holdingregs', 264 , 1, serverId_4, 'uint16');
% Струм PV:
E4_7 = 0.01*read(modb_obj, 'holdingregs', 265, 1, serverId_4, 'uint16');
% Потужність PV:
E4_8 = read(modb_obj, 'holdingregs', 266, 1, serverId_4, 'uint16');
% Загальна згенерована потужність:
E4_9 = read(modb_obj, 'holdingregs', 285 , 1, serverId_4, 'uint16');
E4_10 = read(modb_obj, 'holdingregs', 286, 1, serverId_4, 'uint16');

```

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Слива Артур Анатолійович

Тема: Високоєфективна автономна система електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 80

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є дослідження та створення високоєфективної автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: у першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз автономних систем електроживлення, розібрано основні способи покращити їх показники, проведено аналіз доцільності імплементації автономних систем електроживлення у системи. У другому розділі кваліфікаційної роботи була розроблена формальна модель системи електроживлення, яка складається із сонячних панелей, системи акумуляторів, генератору, та зовнішнього джерела живлення, також було описано та опрацьовано спосіб передачі даних від датчиків до моделі. У третьому розділі кваліфікаційної роботи було розроблено моделі сонячної панелі в середовищі імітаційного моделювання Matlab/Simulink а також систему станів. У четвертому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз розробленого програмного засобу для імітаційного моделювання високоєфективної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо і показано, що модель є значним кроком у напрямку моделювання екологічного, додаткового джерела живлення, сонячних панелей.

4. Позитивні сторони роботи: Наукова цінність роботи полягає у можливості для подальшого дослідження та вдосконалення алгоритмів, спрямованих на підвищення ефективності сонячних систем, а також для використання в практичних застосуваннях у галузі відновлювальної енергетики та освіти

5. Негативні сторони роботи: Недоліком реалізованої системи є залежність від пакету прикладних програм для числового аналізу MATLAB

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні, та заслуговує позитивної оцінки.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (5/A)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) завідувач кафедри фізики та електротехніки, кандидат технічних наук, професор Косенков Володимир Данилович

“ 8 ” грудня 2023 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Слива А.А.

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТм-22-1

### ЗАЯВА

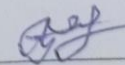
З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

10.12.2023

дата



підпис

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:  
1016027381

Дата перевірки:  
21.12.2023 09:25:48 EET

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
21.12.2023 09:30:12 EET

ID користувача:  
100005862

Назва документа: СливаА(1)

Кількість сторінок: 100 Кількість слів: 12553 Кількість символів: 100144 Розмір файлу: 7.78 MB ID файлу: 1015716538

99 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

## 1.18% Схожість

Найбільша схожість: 0.12% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1005711637)

1.05% Джерела з Інтернету 104 ..... Сторінка 102

0.41% Джерела з Бібліотеки 5 ..... Сторінка 102

## 0.54% Цитат

Цитати 1 ..... Сторінка 103

Посилання 1 ..... Сторінка 103

## 1.02% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

1% Вилучення з Інтернету 29 ..... Сторінка 104

0.06% Вилученого тексту з Бібліотеки 30 ..... Сторінка 104

## Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 56

Підозріле форматування 21 сторінка

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилоч в документах: 10%**

ID: 124205 Назва: МКР Високоєфективна автономна система електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо Додано в БД: 2023-12-21 Автора: Артур СЛИВА Керівники: Валерій МАРТИНЮК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	76895	1125	2333 (3%)	34 (3%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Високоєфективна автономна система електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо.

Автор: Слива Артур Анатолійович

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Мартинюк Валерій Володимирович, завідувач кафедри, доктор технічних наук, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	<b>відповідає</b>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

За результатами перевірки системою Unicheck: схожість - 1.18%, цитати – 0.54%, вилучень – 1,02%. За результатами перевірки системою Anti-Plagiarism v-15.257 максимальний збіг з одним документом склав 1.0%.

Згідно з правилами чинного Положення “Про систему забезпечення академічної доброчесності у хмельницькому національному університеті” від 31.08.2023, авторська робота, обсяг оригінального тексту у відсотках до загального обсягу матеріалу в якій складає 90-100%, визначається роботою з високою унікальністю тексту і допускається до захисту.

Дата \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК