

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

першого (бакалаврського) рівня освіти

на тему:

«УДОСКОНАЛЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ТЗОВ
“ФАВОРИТ-АГРО” М. КОРЕЦЬ, РІВНЕНСЬКОГО РАЙОНУ, РІВНЕНСЬКОЇ
ОБЛАСТІ З ОРГАНІЗАЦІЄЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ»

Виконав: студент 4-го курсу

групи Ен-41 із спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

Уштанюк О. О.

Керівник: _____ к.т.н., доцент Кригуль Р. Є.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Сиротюк С. В.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

" ____ " _____ 2025 р.

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

Уштанюку Оресту Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: "Удосконалення сонячної електричної станції ТзОВ
"Фаворит-Агро" м. Корець, Рівненського району, Рівненської області з
організацією нульового експорту електроенергії"
керівник роботи: к.т.н., доцент Кригуль Р. Є.
(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівський національний університет ветеринарної
медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького 123 к-с від 25.02.2025 р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 17.06.2025 р.

3. Вихідні дані технічна документація, науково-технічна і довідкова
література

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

Вступ

4.1. Аналіз роботи системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт
з точкою нульового експорту електроенергії

4.2. Розрахунок параметрів системи керування сонячною електричною
станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії

4.3 Розробка системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з
точкою нульового експорту електроенергії

4.4. Охорона праці та довкілля

4.5. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання системи
керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового
експорту електроенергії

Висновки і пропозиції

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	Городецький І. М. к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання: 27.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз роботи системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії</i>	4.09.2024 – 22.01.2025	
2	<i>Розрахунок параметрів системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії</i>	23.01.2025 – 29.01.2025	
3	<i>Розробка системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії</i>	03.02.2025 – 13.02.2025	
4	<i>Охорона праці та довкілля</i>	17.02.2025 – 24.02.2025	
5	<i>Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії</i>	26.02.2025 – 14.03.2025	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	20.03.25 – 15.04.25	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	01.05.25 – 30.05.25	

Студент _____ Уштанюк О. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Кригуль Р. Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Уштанюк О. О. «Удосконалення сонячної електричної станції ТзОВ “Фаворит-Агро” м. Корець, Рівненського району, Рівненської області з організацією нульового експорту електроенергії». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025 р. 54 с. текстової частини, 12 таблиць, 19 рисунків, 29 джерел посилання.

Метою кваліфікаційної роботи є покращення ефективності роботи системи управління сонячною електростанцією з нульовою точкою експорту електроенергії, що дозволить знизити витрати енергоресурсів у м. Корець, Рівненської області.

Для досягнення цієї мети було визначено наступні завдання:

1. Здійснити аналіз роботи системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії;
2. Обґрунтувати методику розрахунку параметрів системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії;
3. Здійснити розробку системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії;
5. Здійснити техніко-економічне обґрунтування ефективності використання системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії.

У даній роботі здійснено аналіз роботи системи керування сонячною електричною станцією потужністю 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії, обґрунтовано методику розрахунку параметрів цієї системи, розроблено саму систему керування та проведено техніко-економічне обґрунтування її ефективності.

Ключові слова: фотомодуль, сонячна електростанція, точка нульового експорту електроенергії, системи керування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З ТОЧКОЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	8
1.1 Аналіз роботи системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії.....	8
1.2 Характеристика об'єкту дослідження системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт ТзОВ “Фаворит-Агро” м. Корець, Рівненського р-н, Рівненської обл. з точкою нульового експорту електроенергії.....	9
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З ТОЧКОЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	12
2.1 Обґрунтування параметрів системи контролю генерації та споживання сонячної електростанції потужністю 60 кВт з обмеженням експорту енергії.....	12
2.2 Проектування домашньої сонячної енергосистеми на основі сонячних панелей з точкою нульового експорту електроенергії.....	14
2.3 Прогнозування виробництва електроенергії 60-кВт фотоелектричною системою за допомогою інтелектуальних моделей ANFIS та оптимізованої ANFIS-PSO з нульовою точкою експорту електричної енергії.....	19
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З ТОЧКОЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	25
3.1 Системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії.....	25
3.2 Інтелектуальна система керування сонячною електростанцією на	

основі технологій інтернету речей.....	28
3.3 Традиційні методи моніторингу сонячних станцій.....	29
3.4 Запропонований метод системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії.....	31
3.5 Тестування можливостей акумулятора.....	33
3.6 Аналіз динамічної реакції сонячного шлюзу: пристрій для запобігання нульового експорту електроенергії у фотоелектричних системах генерації.....	35
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	44
4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля.....	44
4.2 Протипожежна безпека і грозовзахист.....	45
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З ТОЧКОЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	46
5.1 Обґрунтування економічної ефективності використання системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії.....	46
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	48
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ.....	50
ДОДАТКИ.....	53

ВСТУП

На сьогодні використання різних відновлюваних джерел енергії, особливо сонячної енергії, значно зросло. Завдяки розвитку технологій ціни на обладнання для відновлюваної енергетики знизилися, що стимулює масштабне впровадження сонячних фотоелектричних установок. Оскільки більшість новітніх продуктів Інтернету речей (ІОТ) орієнтовані на споживчий ринок, розумні мережі використовуються для вирішення всіх енергетичних потреб.

Відвідування «Сонячної електростанції 60 кВт ТЗОВ «Фаворит-Агро» м. Корець, Рівненського р-н, Рівненської обл., буде корисним для збору детальної інформації про сонячну фотоелектричну станцію. Основні необхідні поняття включають: гетерогенну мережу для зв'язку об'єктів, необхідне обладнання для кожного об'єкта, обчислювальну потужність кожного об'єкта та безпеку кожного елемента в ІОТ.

Онлайн-моніторинг сонячної електростанції дозволяє відображати потужність і споживання енергії. У цій запропонованій роботі ми розробимо модель онлайн-моніторингу та управління сонячною електростанцією, щоб уповноважена особа могла контролювати або керувати панелями віддалено, навіть з дому. Показники продуктивності значно покращаться завдяки використанню технологій ІОТ для спостереження та керування фотоелектричною станцією.

Інтернет речей є поєднанням різних технологій. Завдяки сучасній інфраструктурі та можливостям ІОТ дозволяє дистанційно контролювати та керувати параметрами. Використання технології ІОТ значно покращує економічну вигоду, точність та продуктивність.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З ТОЧКОЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1 Аналіз роботи системи керування сонячною електричною станцією з точкою нульового експорту електроенергії

Сонячні електростанції (СЕС) відіграють важливу роль у забезпеченні енергетичних потреб підприємств та приватних домогосподарств. Одним з важливих аспектів їх експлуатації є контроль вироблення та споживання електроенергії з метою уникнення її експорту в загальну електромережу. У даному аналізі розглянуто систему керування СЕС потужністю 60 кВт із впровадженням технології нульового експорту електроенергії.

Загальний опис системи СЕС 60 кВт складається з:

- Фотоелектричних модулів (полікристалічних або монокристалічних);
- Інверторів, що перетворюють постійний струм у змінний;
- Інтелектуальної системи керування енергопотоками;
- Контролера нульового експорту (Zero Export Controller);
- Системи моніторингу та збору даних.

Основне завдання системи керування – забезпечення споживання виробленої електроенергії виключно всередині об'єкта без її постачання в зовнішню електромережу.

Технологія нульового експорту електроенергії та принцип роботи: Контролер нульового експорту аналізує поточне споживання електроенергії на об'єкті та порівнює його з виробленням СЕС. У разі надлишкового виробництва контролер надсилає команди інверторам для обмеження їхньої потужності, щоб уникнути подачі електроенергії в загальну мережу.

Основні елементи технології:

- Датчики струму та напруги – вимірюють параметри електроенергії;
- Інтелектуальні лічильники – фіксують споживання та генерацію енергії;

- Контролер – регулює вихідну потужність інверторів;
- Система управління навантаженням – оптимізує використання виробленої енергії.

Система моніторингу та управління включає:

- Веб-інтерфейс для відстеження стану системи в реальному часі;
- Інтернет речей (IOT) для збору та аналізу даних;
- Автоматичні повідомлення про несправності або відхилення від нормальної роботи.

Управління системою здійснюється за допомогою:

- Автоматичного регулювання потужності інверторів;
- Програмованих алгоритмів розподілу енергії;
- Інтеграції з системами енергозбереження та акумулювання енергії.

Отже впровадження системи нульового експорту електроенергії дозволяє:

- Оптимізувати використання власної генерації;
- Уникнути штрафів та обмежень, пов'язаних з експортом електроенергії;
- Знизити навантаження на загальну електромережу;
- Поліпшити економічну ефективність експлуатації СЕС.

Подальші дослідження можуть включати аналіз інтеграції таких систем з акумуляторними технологіями та оптимізацію алгоритмів керування для підвищення ефективності використання сонячної енергії.

1.2 Характеристика об'єкту дослідження системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт ТзОВ «Фаворит-Агро» м. Корець, Рівненського р-н, Рівненської обл. з точкою нульового експорту електроенергії

ТзОВ «Фаворит-Агро» розташоване в м. Корець, Рівненського р-н, Рівненської обл. Компанія була заснована в листопаді 1995 року з метою створення замкнутого циклу виробництва високоякісних с-г продуктів, що було обумовлено недостатнім забезпеченням сировиною та її низькою якістю, а

також загальною відсталістю сільського господарства та світовою тенденцією до зростання нестачі продовольства.

Основні напрямки діяльності:

Рослинництво: вирощування зернових та технічних культур, зокрема цукрових буряків, для забезпечення сировинних потреб компанії.

Завдяки стратегічному підходу до ведення сільського господарства та впровадженню сучасних технологій, ТзОВ «Фаворит-Агро» займає провідні позиції в аграрному секторі Рівненської області.

Крім цього, структурі підприємства є сонячна електростанція потужністю 60 кВт. Об'єктом дослідження є система керування сонячною електричною станцією (СЕС) потужністю 60 кВт (див. додаток А.1), оснащеною механізмом нульового експорту електроенергії. Головною метою впровадження такої системи є максимальне використання виробленої електроенергії всередині об'єкта без передачі надлишків у загальну енергомережу. Це дозволяє уникнути регуляторних обмежень та штрафів за надмірне постачання електроенергії в зовнішню мережу.

Основні технічні характеристики системи:

Потужність сонячної електростанції: 60 кВт

Тип сонячних панелей: Полікристалічні або монокристалічні

Тип інверторів: Мережеві (grid-tie) з можливістю обмеження експорту

Система керування: Контролер нульового експорту (Zero Export Controller)

Моніторинг: Веб-інтерфейс та IoT-платформи

Акумуляторна система (за потреби): Літій-іонні або гелеві батареї для накопичення надлишкової енергії

Функціональні можливості системи:

Автоматичне регулювання вироблення електроенергії – система керування регулює вихідну потужність сонячних панелей та інверторів, щоб уникнути подачі надлишкової енергії в мережу.

Розумний моніторинг – використання IoT-рішень для збору та аналізу даних у режимі реального часу.

Гнучке налаштування параметрів – можливість адаптації алгоритмів керування в залежності від споживання та вироблення енергії.

Інтеграція з локальними споживачами – оптимізація енергоспоживання через розподіл потужності між навантаженнями.

Технологія нульового експорту:

Принцип роботи контролера нульового експорту базується на постійному моніторингу споживання електроенергії на об'єкті та регулюванні вихідної потужності інверторів. Контролер визначає різницю між генерацією та поточним споживанням і у разі надлишку подає команду на зменшення вироблення енергії або перенаправлення її до локальних акумуляторів.

Очікувані переваги впровадження:

Оптимізація енергоспоживання – використання всієї виробленої електроенергії без втрат.

Зменшення навантаження на зовнішню енергомережу – мінімізує негативний вплив на стабільність загальної мережі.

Підвищення економічної ефективності – скорочення витрат на електроенергію та відсутність додаткових платежів за її експорт.

Автоматизація процесів – мінімізація потреби в ручному втручанні та підвищення рівня контролю над системою.

Запровадження системи керування СЕС з нульовим експортом електроенергії дозволяє значно підвищити ефективність використання відновлюваних джерел енергії та сприяє розвитку автономних енергетичних рішень.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З ТОЧКОЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Обґрунтування параметрів системи контролю генерації та споживання сонячної електростанції потужністю 60 кВт з обмеженням експорту енергії

Сонячні електростанції (СЕС) широко використовуються для генерації електроенергії з відновлюваних джерел. Однак для оптимального використання виробленої енергії важливо забезпечити нульовий експорт електроенергії до мережі, що вимагає застосування систем контролю енергетичних потоків.

Обґрунтування основних параметрів СЕС

- Потужність станції (60 кВт): Вибір обумовлений середнім рівнем споживання на об'єкті та можливістю ефективного використання сонячної енергії без перевищення дозволеної межі генерації.
- Середня річна генерація ($\approx 70\,000$ кВт·год): Визначена на основі сонячної інсоляції регіону та ефективності встановлених панелей.
- Максимальна генерація в сонячний день (до 350 кВт·год): Розрахована на основі пікової потужності станції та середньої тривалості сонячного випромінювання.
- Тип інверторів (мережеві з можливістю обмеження експорту): Дозволяє точно регулювати потужність вихідного сигналу, щоб запобігти надлишковому експорту електроенергії до мережі.
- Кількість інверторів (3×20 кВт): Вибір здійснено з урахуванням надійності та ефективного розподілу навантаження між пристроями.
- Система накопичення енергії (АКБ на 50 кВт·год, за необхідності): Використовується для зберігання надлишкової енергії та її подальшого використання в періоди пікового навантаження.

Обґрунтування системи контролю:

- Пристрій обмеження експорту: Встановлення енергометра на точці підключення до мережі дозволяє точно контролювати енергетичні потоки.

- Принцип роботи: Інтелектуальна система контролю регулює вихідну потужність інверторів на основі поточного споживання електроенергії на об'єкті.

- Алгоритм керування:

1. Моніторинг споживання в реальному часі забезпечує точне вимірювання навантаження.

2. Аналіз генерації СЕС дозволяє уникати перевиробництва.

3. Регулювання потужності інверторів запобігає віддачі надлишкової енергії в мережу.

Обґрунтування вибору обладнання:

- Енергометр (Schneider iEM3255 або аналог): Забезпечує високу точність вимірювань енергетичних потоків.

- Контролер керування (Victron Cerbo GX або PLC-контролер): Використовується для інтеграції даних з інверторів та енергометра.

- Інвертори (Huawei SUN2000-20KTL): Гарантують високу ефективність перетворення енергії та можливість дистанційного регулювання потужності.

- Система зв'язку (Modbus TCP/IP): Дозволяє швидку передачу даних між компонентами системи керування.

Моделювання роботи систем для перевірки ефективності керування використовується програмне забезпечення (PVsyst, Matlab Simulink), що дозволяє змоделювати роботу системи в різних режимах (денне/нічне навантаження, пікові години).

Отже, запропонована система забезпечує ефективне керування генерацією СЕС, дозволяючи уникнути експорту електроенергії до мережі, що відповідає вимогам локальних енергетичних регуляторів та дозволяє оптимізувати власне споживання.

2.2 Проектування домашньої сонячної енергосистеми на основі сонячних панелей з точкою нульового експорту електроенергії

Сонячні елементи (фотовольтаїчні елементи) є пристроями, здатними перетворювати сонячну енергію на електроенергію. Сонячні панелі є напівпровідниковими пристроями, що складаються з р-n (позитивно-негативних) переходів. У цих переходах електрони передаються від n-типу напівпровідника до р-типу і навпаки для полярного руху [1].

На основі цього пояснення електрони та їхній полярний рух створюють фотогенерацію, як показано на рис. 2.1.

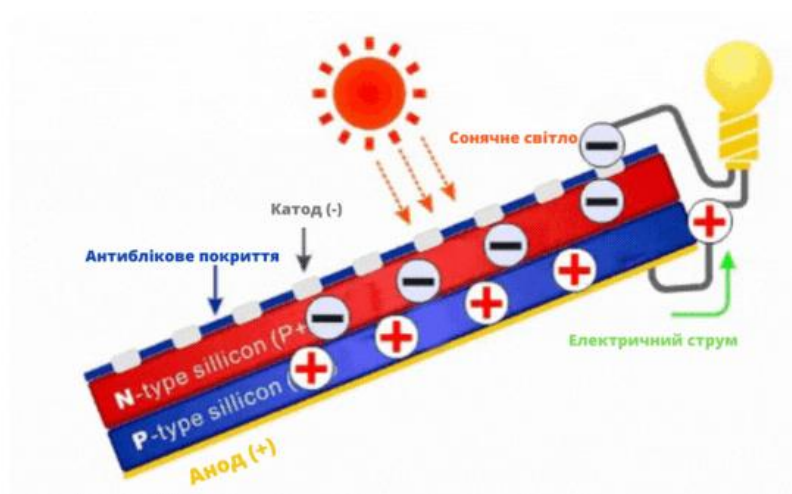


Рисунок 2.1 – Процес фотогенерації [1].

Основні характеристики сонячних панелей впливають на параметри сонячних панелей або фотовольтаїчних елементів, що визначають вироблення оптимальної електричної енергії. Ці параметри є орієнтиром для оцінки продуктивності сонячних панелей у процесі генерації електроенергії [2].

Графік параметра I-V (струм-напруга) сонячної панелі представлений на рис. 2.2.

Струм короткого замикання (I_{sc}) — це максимальний струм, який може забезпечити сонячна панель при відсутності короткого замикання або несправностей. Водночас, напруга відкритого кола (V_{oc}) — це найбільша напруга, яку може досягти сонячна панель без підключеного навантаження (без струму, що надходить від панелі до навантаження) [3]. Підвищена температура

в сонячних панелях виникає через тепло, що генерується внаслідок поглинання сонячного випромінювання. З усієї енергії, яка потрапляє на фотогальванічні панелі, лише 20% перетворюється в електричну енергію [4], а решта енергії переходить в тепло. Це накопичення тепла підвищує робочу температуру панелей, що, в свою чергу, знижує їх електричну ефективність. Конверсійна ефективність PV панелей зменшується на 0,40-0,50% з кожним підвищенням температури на 1 градус [5-6].

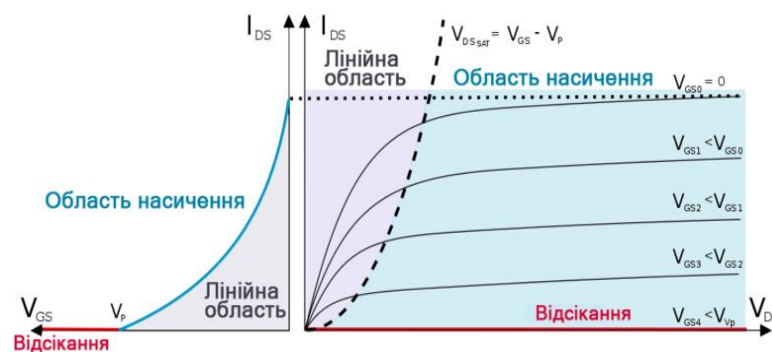


Рисунок 2.2 – Взаємозв'язок між струмом (I) і напругою (V) для отримання максимальної потужності сонячної панелі [2].

Однак реальні умови сонячного випромінювання рідко відповідають стандартним даним, оскільки це залежить від конкретних кліматичних умов кожного регіону. Дослідження фокусується на напрузі, де фотогальванічні елементи відіграють важливу роль у регулюванні коефіцієнтів температури для V_{oc} , P_{max} та Коефіцієнта заповнення (FF), які мають негативний вплив, тоді як для I_{sc} вплив є позитивним [7]. Точка максимальної потужності (V_{mpp} та I_{mpp}) на характеристичній кривій I - V є оптимальним режимом роботи, при якому сонячні панелі генерують максимальну потужність при навантаженні. Максимальну потужність можна обчислити за рівнянням (2.1).

$$P_{max} = V_{oc} I_{sc} FF \quad (2.1)$$

де P_{max} – це точка максимальної потужності (MPP), V_{oc} – напруга холостого ходу, I_{sc} – струм короткого замикання, а FF — заповнювальний фактор (Fill Factor), який є параметром, що впливає на максимальну потужність сонячної

панелі, а також на її якість і може бути розрахований за рівнянням (2.2). Важлива характеристика FF подана у рівнянні (2.3).

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.2)$$

$$\frac{V_{mpp} I_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} FF = \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} \frac{P_{\max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.3)$$

де V_{mpp} – максимальна напруга, I_{mpp} – максимальний струм. Потужність можна розрахувати за рівнянням (2.4).

$$P = VI \quad (2.4)$$

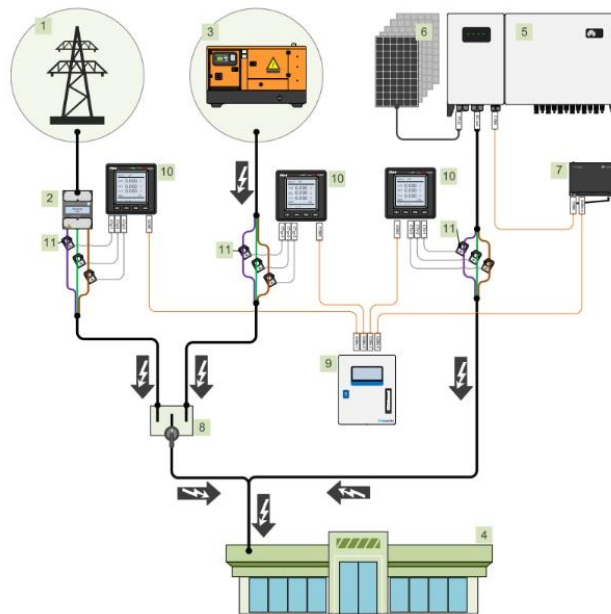
де P – потужність, Вт, V – напруга, В, I – струм, А.

Сонячні панелі – це зібрані пристрої з фотогальванічних елементів, які перетворюють сонячне світло в електроенергію. Однак, попри досягнення в комерційних сонячних панелях із ККД 15%, це залишається однією з головних причин, чому сонячна енергетика досі не може конкурувати з викопним паливом. Комерційні сонячні панелі рідко перевищують ефективність у 20%. Фотогальванічні елементи, подібно до батарей, виробляють постійний струм, який зазвичай використовується для малих навантажень (електронного обладнання). Коли постійний струм від фотогальванічних елементів використовується для віддалених домашніх застосувань, електромережі зазвичай працюють на змінному струмі. У такому випадку він має бути перетворений у змінний струм (АС) за допомогою інвертора – твердотільного пристрою, що перетворює постійний струм у змінний [8; 9].

Багато зусиль з оптимізації роботи сонячних елементів враховують різні фактори, що впливають на їхню продуктивність. У цьому дослідженні основна увага приділяється таким компонентам, як сонячні панелі, інвертори, акумулятори та контролери заряду, які підтримують роботу енергосистеми. Дослідження сонячних панелей проводилося з урахуванням місця розташування та часу/дати, що відіграють важливу роль у їхній продуктивності.

Сонячні елементи можуть безпосередньо перетворювати енергію сонячного світла в електроенергію. У цьому дослідженні основна увага

приділялася розробці схема сонячної електростанції для домогосподарства показана на рис. 2.3.



- 1 Центральна мережа
- 2 Лічильник (ввід від центральної мережі)
- 3 Генератор
- 4 Споживач (навантаження)
- 5 Інвертор
- 6 Фотоелектричні модулі
- 7 Система моніторингу інвертору (SmartLogger)
- 8 Перемикач джерел енергії мережа-генератор (ABP – автоматичний ввід резерву)
- 9 Контролер управління (ENcombi ECcube2)
- 10 Лічильник (Meter Pilot SPM33)
- 11 Трансформатори струму

Рисунок 2.3 – Схема сонячної електростанції для домогосподарства з точкою нульового експорту електроенергії

Щільність потужності, що випромінюється Сонцем у зовнішній атмосфері, становить $1,373 \text{ кВт/м}^2$ [10]. Коли сонячне світло досягає поверхні Землі, його пікова щільність становить 1 кВт/м^2 протягом дня в тропіках.

Окремі сонячні елементи можуть об'єднуватися у панелі, як показано на рис. 2.3. Ці панелі можна згрупувати у великі масиви сонячних елементів. Термін "масив" зазвичай використовується для позначення панелей або груп панелей сонячних батарей.

Сонячний елемент – це активний компонент, що перетворює сонячне світло в електричну енергію. Зазвичай він має мінімальну товщину 0,3 мм і виготовляється з напівпровідникових пластин з позитивними та негативними полюсами. Основний принцип роботи сонячних елементів базується на фотоелектричному ефекті, який дозволяє безпосередньо перетворювати сонячне світло в електричну енергію [11].

Контролер заряду сонячної батареї

Контролер заряду – це електронний пристрій, що регулює постійний струм (DC), який заряджає акумулятор і передає енергію до навантаження [12-14], як показано на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Контролер заряду сонячної батареї

Цей пристрій запобігає перезаряду акумулятора (коли батарея заповнена) і захищає від перенапруги з сонячної панелі. Перенапруга та надмірний заряд можуть зменшити термін служби акумулятора. Контролер забезпечує:

- Правильне та безпечне заряджання акумулятора.
- Захист від надмірного розряду.
- Захист від перевантаження струмом.
- Відображення стану акумулятора та потоку електроенергії

[15-16].



Рисунок 2.5 – Акумулятор (батарея).



Рисунок 2.6 – Інвертор.

2.1. Електродвигун

Акумулятори є джерелом постійного струму (DC). У цій системі використовуються два акумулятори по 70 А·год. Вони належать до електрохімічних елементів, які перетворюють хімічну енергію в електричну.

В сонячних електростанціях інвертори використовуються для перетворення постійного струму (DC) у змінний струм (AC) [17-19]. У цій системі використовується інвертор потужністю 1000 Вт і напругою 24 В.

2.3 Прогнозування виробництва електроенергії 60 кВт фотоелектричною системою за допомогою інтелектуальних моделей ANFIS та оптимізованої ANFIS-PSO з нульовою точкою експорту електричної енергії

Дане дослідження ґрунтується на вивченні фотовольтаїчної системи, розташованої в Центрі досліджень і передових технологій Національного

політехнічного інституту (CINVESTAV-IPN) в м. Корець, Рівненського р-н, Рівненської обл. (широта $50^{\circ}30'48''$ N і довгота $23^{\circ}07'57''$ W).



а)



в)

Рисунок 2.7 – Фотовольтаїчна система. (а) Фронтальне аерофото та (в) Бокове аерофото.

Фотовольтаїчна установка складається з 240 монокристалічних кремнієвих модулів бренду Solartec (модель S60MC, в м. Корець, Рівненського р-н, Рівненської обл.), змонтованих на алюмінієвій конструкції з азимутальною орієнтацією 30° на схід від географічного півдня та під кутом нахилу 50° .

Кожен модуль має номінальну потужність 250 Вт і високу ефективність елементів до 15%, що в сумі забезпечує загальну потужність 60 кВт. На рисунку 1 показано фотовольтаїчну систему.

Масив фотовольтаїчних модулів розділений на п'ять секцій. Кожна секція складається з ланцюга з 48 модулів, з 12 з'єднаннями послідовно і 4 паралельно. Номінальна потужність кожної секції становить приблизно 11,9 кВт.

Система оснащена одним інвертором бренду Fronius, моделлю IG Plus V11.4.2 DELTA (Петтенбах, Австрія), який має потужність 11,4 кВт на секцію та максимальний ККД 96,2%.

У системі встановлено термопіроелектричний піррадіометр ЕКО MS-602 (Токіо, Японія) під кутом 50° від горизонталі, технічні характеристики якого такі:

- спектральна похибка: $\pm 0.2\%$,
- температурна реакція (-20°C до 50°C): $\pm 2\%$,
- діапазон довжин хвиль (Нм): 285–3000,
- діапазон опромінення ($\text{Вт}/\text{м}^2$): 0–2000,
- робоча температура: -40°C до 80°C ,
- калібрувальна трасованість/невизначеність: ISO 17025/WRR/ $<0.7\%$ ($k = 1.96$).



а)



в)



с)

Рисунок 2.8 – Датчики та компоненти фотовольтаїчної системи. (а) Інвертор, (в) Термопіроелектричний піррадіометр, (с) Анемометр.

Крім того, на місці встановлено анемометр для вимірювання швидкості вітру. На рисунку Нарешті, кожен реєстратор даних записує та інтегрує метеорологічні та енергетичні параметри системи кожні 5 хвилин, 24 години на добу. Зареєстровані змінні включають:

- швидкість вітру ($\text{м}/\text{с}$),
- температуру модулів ($^{\circ}\text{C}$),
- температуру навколишнього середовища ($^{\circ}\text{C}$),
- сонячну радіацію ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$),
- вихідну потужність системи (кВт),

які використовувалися як вхідні параметри інтелектуальної моделі.

Проектування розумного алгоритму, аналіз записів, навчання та тестування прогнозів здійснювалися на ноутбучі з процесором Intel Core i3-1005G1 та 8 ГБ оперативної пам'яті.

На першому етапі було виконано обробку інформації (збір, вилучення, зберігання, структурування та аналіз) через великий обсяг зібраних записів. Дані були вилучені з історичних файлів та розподілені відповідно до часових послідовностей кожної вхідної та вихідної змінної.

На другому етапі, щоб визначити рівень впливу кожної вхідної змінної на електрогенерацію системи, було проведено кореляційний аналіз. Дослідження допомагає описати взаємозв'язок між кількісними та категоріальними змінними, де асоційовані змінні змінюються синхронно.

Було використано близько 225 441 записів на змінну за приблизно 26 місяців. Для оцінки зв'язку між змінними застосовували коефіцієнт кореляції Пірсона (Рівняння (2.5)) та коефіцієнт кореляції Спірмена (Рівняння (2.6)), детально описані в [55].

$$r_p = \frac{\sum d_x d_y}{\sqrt{\sum d_x^2 d_y^2}}, \quad (2.5)$$

$$r_s = \frac{1 - 6 \sum d_i}{n(n^2 - 1)}, \quad (2.6)$$

де r_p – коефіцієнт кореляції Пірсона; $\sum d_x d_y$ – сума добутків квадратів; $\sum d_x^2$ і $\sum d_y^2$ – суми квадратів змінних X і Y відповідно; r_s – коефіцієнт кореляції Спірмена; $d_i = X_i - Y_i$ – різниця в рангах відповідних змінних; N – кількість спостережень.

Отримані результати кореляційного аналізу представлені в таблиці 2.1 зображені прилади, що підтримують роботу фотовольтаїчної системи.

Таблиця 2.1 – Кореляція вхідних змінних щодо вихідної змінної – виробленої потужності фотоелектричної системи.

Вхідні змінні	Коефіцієнт	Кореляція	R ²
Глобальна горизонтальна сонячна радіація	Пірсон	0,997	0,994
Температура модуля	Пірсон	0,94	0,88
Температура навколишнього середовища	Пірсон	0,86	0,74
Швидкість вітру	Спірмен	1,16	1,35

Результати моделей оцінювалися за суворими статистичними метриками, математичні формули яких були знайдені та адаптовані з літератури [6, 7].

Статистичні методи, використані для оцінки ефективності моделей, включали:

- корінь середньоквадратичної помилки (RMSE),
- корінь середньоквадратичної відносної помилки (RMSPE),
- середню абсолютну помилку (MAE),
- середню абсолютну відносну помилку (MAPE).

Для обчислення цих показників використовували рівняння (2.7) – (2.10). RMSE (2.7) є квадратичним механізмом оцінки, що вимірює середню величину помилок. d_i прогнозовані значення, y_i спостережувані значення, n кількість спостережень.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2} \quad (2.7)$$

Однак RMSPE (2.8) обчислює квадратний корінь із середнього значення квадратів відносних помилок. Він має ті ж властивості, що й RMSE, з тією різницею, що результати виражаються у відсотках. n – кількість зразків, y_t – поточне значення, а $\hat{y}_t$ – оцінка. Функція втрат для цього показника – це квадрат помилки.

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{y_t - \hat{y}_t}{|y_t|} \right)^2} \quad (2.8)$$

MAE (2.9) забезпечує загальну та обмежену міру продуктивності моделі. Відповідає оцінці абсолютної помилки. Цей рівень вказує на середню величину справжніх і передбачених значень. $\hat{Y}_i$ – це оцінене значення, Y_i – поточне значення, а N – кількість зразків. Чим ближче MAE до нуля, тим точнішою вважається модель.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (2.9)$$

MAPE (2.10) визначає точність у відсотках порівняно з фактичним значенням. n – кількість підігнаних точок, A_t – фактичне значення, F_t – прогнозоване значення, а Σ – знак суми (абсолютне значення підсумовується для кожної точки у прогнозованому періоді).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (2.10)$$

Отже, на основі результатів вимірювань і збору даних, а також загального аналізу, можна зробити такі висновки:

1. Принцип роботи PLTS полягає в перетворенні сонячної теплової енергії в електричну за допомогою сонячних панелей, після чого вона зберігається в акумуляторах.

2. Для перетворення постійної напруги 24 В від акумулятора в змінну напругу 220 В використовується інверторна схема.

3. У процесі розподілу струму та напруги від сонячних панелей утворюється приблизно $\pm 30,2$ В у з'єднанні послідовно, проте зарядка акумулятора відбувається стабільно із середнім максимальним значенням 24,5 В, при цьому сонячний контролер заряду регулює весь процес розподілу.

4. Напруга і струм починають зростати вранці з 06:00 WIB до 10:00 WIB, досягають максимуму з 10:00 до 12:00 WIB, а потім поступово знижуються до вечора.

Недоліком цієї системи сонячних батарей є низька енергоефективність за умов різких змін погоди. Якщо погода сонячна, процес зарядки відбувається дуже добре, однак усе залежить від характеристик використовуваного типу сонячних батарей. Для подальшого розвитку, щоб отримати більше енергії з панелі, доцільно встановити автоматичну систему відстеження сонця, яка зможе орієнтувати панелі у напрямку сонячного світла.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З ТОЧКОЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1 Системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії

У сучасних умовах розвитку відновлюваної енергетики актуальним завданням є ефективне керування генеруючими потужностями сонячних електростанцій (СЕС) для мінімізації впливу на енергомережу та забезпечення локального споживання енергії. Основною метою даного розділу є розробка системи керування СЕС потужністю 60 кВт з механізмом нульового експорту електроенергії. Це дозволяє уникнути перевантаження мережі та підвищити ефективність використання сонячної енергії.

1. Аналіз вимог до системи керування

Система керування повинна виконувати такі функції:

Моніторинг генерації електроенергії фотоелектричними модулями.

Контроль рівня споживання електроенергії на об'єкті.

Регулювання потужності інверторів для запобігання експорту в мережу.

Взаємодія з системами накопичення енергії (за наявності).

Інтеграція з системами диспетчеризації та моніторингу.

Виявлення аварійних ситуацій та захист системи від перевантажень.

Оптимізація використання сонячної енергії відповідно до потреб об'єкта.

2. Архітектура системи керування

2.1. Основні компоненти системи

Система складається з таких основних компонентів:

Фотоелектричні модулі (ФЕМ) – перетворюють сонячне випромінювання в електроенергію.

Інвертори – перетворюють постійний струм ФЕМ у змінний та забезпечують стабільність роботи системи.

Енергетичний лічильник – вимірює двонаправлений потік енергії та передає дані до контролера.

Контролер керування потужністю – регулює роботу інверторів на основі даних від лічильника.

Система збору та аналізу даних (SCADA або IoT-платформа) – забезпечує моніторинг та диспетчеризацію системи.

2.2. Принцип роботи системи

Лічильник вимірює потік енергії в точці підключення до мережі.

Контролер керування отримує дані з лічильника та аналізує рівень експорту.

У разі виявлення надлишку енергії система знижує потужність інверторів.

Якщо на об'єкті є акумуляторна система, надлишок спрямовується на зарядку акумуляторів.

Дані про стан системи передаються на сервер для моніторингу та аналізу.

В разі необхідності система може автоматично змінювати алгоритми роботи відповідно до поточних умов.

3. Вибір обладнання

3.1. Інвертори

Для реалізації системи обрані інвертори з підтримкою функції обмеження експорту (наприклад, Huawei SUN2000 або SMA Sunny Tripower). Ці пристрої дозволяють гнучко керувати потужністю генерації відповідно до вимог системи.

3.2. Енергетичний лічильник

Обрано багатофункціональний лічильник (наприклад, Fronius Smart Meter або Carlo Gavazzi), що підтримує вимірювання двонаправленого потоку енергії. Він дозволяє точно відстежувати рівень споживання та генерації.

3.3. Контролер керування

Контролер на базі промислового мікроконтролера (наприклад, Raspberry Pi або PLC Siemens LOGO!), що обробляє дані від лічильника та керує

інверторами. Використання програмованого логічного контролера (PLC) дозволяє підвищити надійність роботи системи.

4. Програмне забезпечення

4.1. Алгоритм роботи

Отримання даних з лічильника та датчиків.

Аналіз споживання та генерації.

Розрахунок необхідного рівня зниження потужності.

Відправка команд на інвертори.

Логування даних для подальшого аналізу.

Виявлення аварійних ситуацій та прийняття заходів щодо їх усунення.

4.2. Інтерфейс моніторингу

Розроблено веб-інтерфейс для віддаленого моніторингу стану системи в реальному часі, що дозволяє переглядати графіки споживання, генерації та рівня заряду акумуляторів. Користувач може налаштовувати параметри роботи системи та отримувати повідомлення про можливі несправності.

5. Тестування та впровадження системи

5.1. Лабораторне тестування

Перед введенням у експлуатацію система пройшла лабораторні випробування, під час яких перевірялася її здатність до регулювання потужності та реагування на зміну споживання.

5.2. Польові випробування

Після успішного тестування система була встановлена на реальному об'єкті, де проводився моніторинг її ефективності. В ході випробувань система продемонструвала стабільну роботу та точне дотримання режиму нульового експорту.

Отже, запропонована система дозволяє ефективно керувати СЕС потужністю 60 кВт, забезпечуючи нульовий експорт електроенергії до загальної мережі. Це підвищує стабільність електромережі та дозволяє оптимізувати споживання енергії на об'єкті. Крім того, система має високу надійність, гнучкість налаштувань та можливість розширення в майбутньому.

3.2 Інтелектуальна система керування сонячною електростанцією на основі технологій інтернету речей

Зараз використання різних відновлювальних джерел енергії, особливо сонячної енергії, значно збільшилось. Ціни на обладнання для відновлювальної енергії знижуються завдяки розвитку технологій, що стимулює великомасштабні сонячні фотовольтаїчні установки. Оскільки більшість новітніх продуктів у сфері Інтернету речей (IoT) застосовуються в споживчій промисловості, смарт-мережі використовуються для всіх ваших енергетичних рішень. Основні необхідні терміни включають гетерогенну мережу для комунікації об'єктів, необхідне обладнання для кожного об'єкта, обробну/обчислювальну потужність кожного об'єкта та безпеку кожного елементу в інтернеті речей.

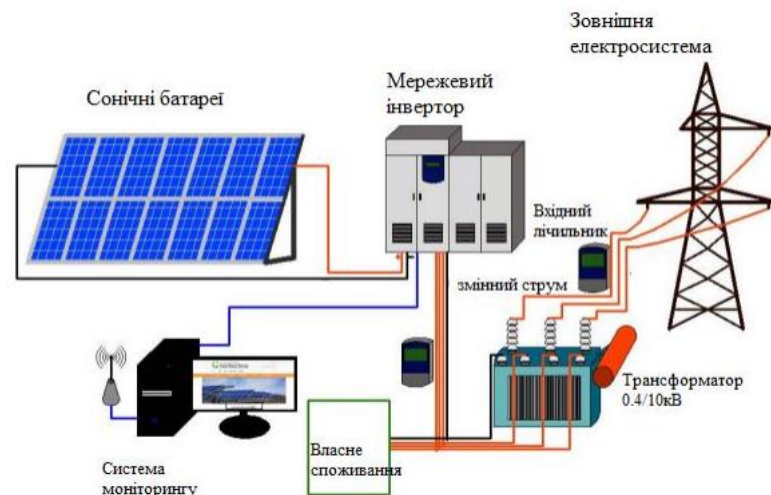


Рисунок 3.1 – Інтернет речей (IoT)

Онлайн-моніторинг сонячної енергетичної станції може бути виконаний для відображення використання потужності та енергії. У цьому запропонованому дослідженні ми розробимо модель онлайн-моніторингу сонячної енергії, а також її керування, щоб авторизовані особи могли моніторити або керувати панелями віддалено, навіть вдома. Параметри ефективності значно покращаться завдяки використанню технології інтернету речей для спостереження та контролю сонячної фотовольтаїчної станції.

Інтернет речей є поєднанням різних технологій. З наявною інфраструктурою та можливостями інтернет речей корисний для віддаленого сенсування та контролю параметрів. Грошові переваги, точність та ефективність можуть бути значно покращені за допомогою технології Інтернету речей.

3.3 Традиційні методи моніторингу сонячних станцій

Було виконано багато робіт з моніторингу сонячної енергії, використовуючи PLC, SCADA, Zigbee, Bluetooth, LOWPAN та інші технології. Тут ми класифікуємо цей огляд на дві частини: перша – це методи моніторингу, а друга – методи керування сонячною енергетичною станцією. Тут детально розглядаються деякі традиційні методи. МПТТ (методи максимального відбору потужності) залежить від модулів Zigbee для збору всієї інформації та записів використовується один хост-контролер для низької вартості виробництва. Метод шлюзу поєднується з GPRS [6], а сонячні панелі використовуються для модифікації всього в інтелектуальні системи за допомогою інтернету речей (IoT). Бездротові сенсорні мережі та інтернет речей набувають все більшого значення в смарт-середовищах і нашому повсякденному житті, оскільки вони використовуються для здоров'я, обслуговування та безпеки. Смарт-мережі забезпечують додаткові модифікації в інформаційно-комунікаційних технологіях, що сприяють більш надійній та ефективній електричній системі. У випадку [13] докладно обговорюються труднощі з технікою немеханічного моніторингу навантаження, особливо для застосувань у безпеці. Для впровадження економічно ефективної системи збору даних з безперервним відстеженням параметрів ефективності та наданням віддаленого енергопостачання в роботі [14] обговорюються різні концепції. Усі рішення та результати цієї роботи можуть бути використані для прямого доступу до з генерованої електричної енергії на сільських ділянках. Запропонований метод включає, як апаратне, так і програмне забезпечення. Фотовольтаїчний тип

модуля, обговорений у випадку [3], може безперервно моніторити сонце, після чого буде досягнута максимальна сонячна енергія, що ефективно модифікує коефіцієнт використання сонячної енергії та ефективність фотовольтаїчної системи генерації енергії. Телекомунікаційні станції можуть бути віддалено моніторинговані, що було розроблено та започатковано різні процедури в них, також у роботі [12] запропонована така інтегрована система. Основні ключові особливості цих систем [12] полягають в тому, що вони поєднують функції віддаленого моніторингу та управління в одну систему, що модифікує користувацькі інтерфейси. У межах сонячних панелей також обговорюється реалізація інфраструктури моніторингу сонячної енергії в реальному часі [10].

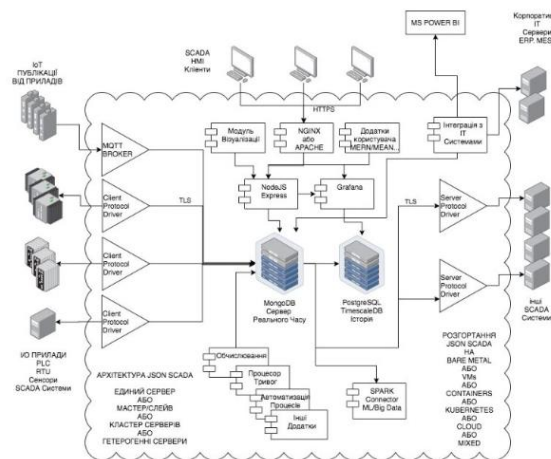


Рисунок 3.2 – Моніторинг сонячної енергії з використанням PLC і SCADA.

Далі менш вартісні Android пристрої [5] можуть бути замінені на LCD, які є графічними типами пристроїв. Завдяки вдосконаленій графічній візуалізації та сенсорному інтерфейсу користувача, інтернет-модем RES Power Conditioning Unit (PCU) збільшує потужність системи. Для цього застосування потрібен інтерфейс Bluetooth і підключення до Інтернету для планшета Android або ноутбука. PCU має секцію цифрової обробки сигналів і програмовану логічну матрицю в залежності від цифрової платформи з апаратним забезпеченням і підтримкою технології Bluetooth та послідовних протоколів комунікації, таких як UART. Застосування, як-от смарт-місто, смарт-середовище та смарт-підприємства, також були адаптовані до сучасного рівня технології Інтернету речей [15]. За всіх атмосферних умов новий тип PLC, а саме Delta PLC [16],

здатен більш точно відстежувати та моніторити сонячну систему, а процес також спрощено.

3.4 Запропонований метод системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії

Для правильного впровадження та віддаленого доступу до всіх записів сонячної енергетичної станції буде використано наступну методологію: перед виробництвом запропонованої системи на базі IoT будуть розроблені та змодельовані різні модулі. Після аналізу результатів буде враховано оптимізацію. Протокол HTTP через LAN або інтернет разом з відкритим програмним забезпеченням Інтернету речей та API буде використовуватися для зберігання та збору даних з різних пристроїв.

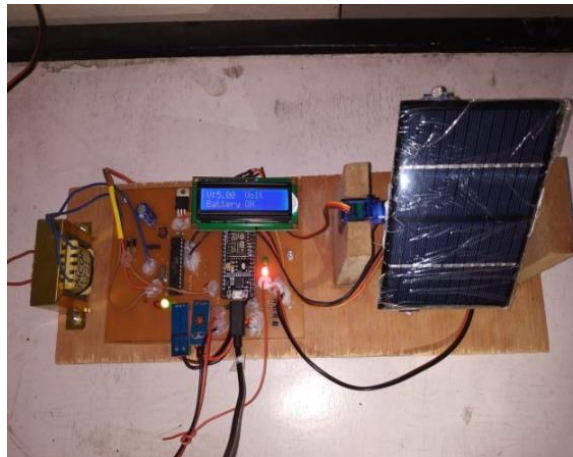
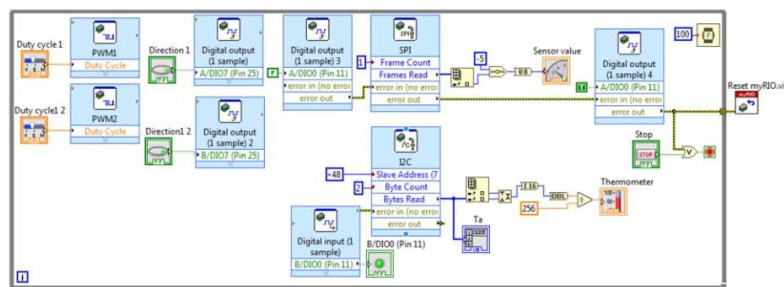


Рисунок 3.3 – Моніторинг сонячної енергії з використанням IoT-апаратного забезпечення.

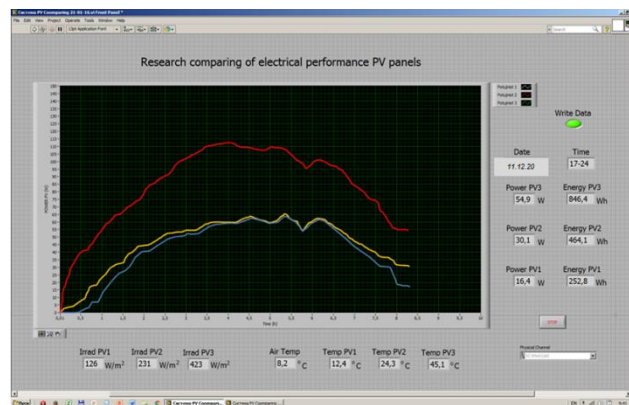
Відкрите програмне забезпечення IoT надає можливість створювати додатки для реєстрації сенсорів і відстеження місцеположення та моніторингу, а також соціальну мережу речей зі змінами статусів. У запропонованій роботі сонячні енергетичні панелі підключені до сенсорів, які вимірюють значення напруги та струму. Отримане значення напруги подається як вхід до мікроконтролера, який відображає всі записи та дані на веб-сторінці. Мікроконтролер відіграє дуже важливу роль в цьому процесі, як посередник між вхідними та вихідними модулями. Після того, як система буде успішно

розроблена та змодельована в програмному забезпеченні, вона буде готова до виготовлення. Запропонована онлайн-система керування за допомогою IoT буде виготовлена.

Результат цієї роботи полягає в моніторингу, відстеженні та контролю фотовольтаїчної системи, тобто масивів сонячних панелей на сонячних енергетичних станціях, таких як значення напруги та струму. Ці параметри будуть надіслані на створену веб-сторінку за допомогою LAN або інтернет-з'єднання. Запропонована робота стосується відстеження та моніторингу сонячних панелей з використанням IoT, цей моніторинг може здійснюватися через хмару. Отже, дані та панелі можуть бути керовані й на віддалених місцях. Моніторинг здійснюється через контролер, використовуючи фреймворк Flask як інтерфейс. Фізичні пристрої не підключені до цих систем, але можуть бути керовані віддалено через інтернет-з'єднання.



а)



б)

Рисунок 3.4 – (а) База даних енергії, доступна на веб-сторінці ВП LabView, що розроблена для керування платформою відстеження сонячних променів та (б) модельована кількість сонячної енергії, що виробляється за рік фотоелектричною станцією Jinko Solar JKM250P-160

Інтелектуальне відстеження або моніторинг сонячної енергетичної станції значно збільшить використання відновлювальної енергії на сонячних електростанціях. Це допоможе користувачам аналізувати використання енергії, її вплив на відновлювальне використання енергії та енергетичні проблеми на сонячних енергетичних станціях. Рис. 3.4 показують програмну реалізацію запропонованого методу. Усі записи доступні користувачеві віддалено через створену веб-сторінку. Ця запропонована робота підвищить ефективність сонячних енергетичних станцій для генерації більшої кількості енергії.

Графічна візуалізація зібраної інформації показує, що всі записи будуть доступні авторизованому користувачеві через хмару, тому всі панелі та система можуть бути моніторинговані та відстежувані онлайн за допомогою IoT. Застосування систем відстеження включають дахи сонячних панелей, наземні сонячні панелі, сонячні міста, смарт-села, смарт-середовища, смарт-мікромережі та сонячні вуличні ліхтарі. Ця ера Інтернету речей або мережі речей знаходить багато застосувань. Для ефективної системи управління енергією використовувались різні традиційні методи, такі як PLC, SCADA, Bluetooth, Zigbee, але IoT спрощує відстеження сонячних панелей і віддалений доступ до всіх записів енергії, згенерованої на сонячних енергетичних станціях.

Отже, результати дослідження показують, що сонячні батареї виробляють напругу, перетворюючи сонячну енергію в електрику. Сонячні батареї виробляють напругу 17,5 В постійного струму. Було використано 40 полікристалічні (Polycrystalline) сонячні панелі потужністю 50 Вт кожна, що дозволило заряджати дві батареї ємністю 12×70 А·год, з'єднані послідовно.

3.5 Тестування можливостей акумулятора

Розподіл струму та напруги встановлених сонячних панелей забезпечує напругу приблизно $\pm 17,5$ В на панель, але процес зарядки акумуляторів залишається стабільним на середньому рівні 13,5 В. Розподіл енергії регулюється сонячним контролером заряду (Solar Charge Controller, SCC). Потік

енергії починає зростати вранці о 07:30 WIB, досягаючи максимального рівня в обідній час (10:00–14:00 WIB), а потім починає знижуватися о 18:00 WIB.

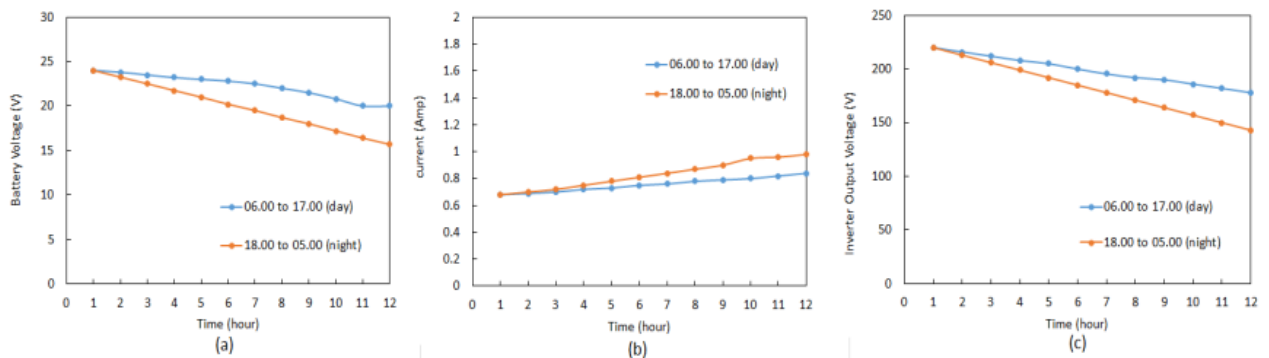


Рисунок 3.5 – Демонструє здатність акумулятора підтримувати навантаження АС 125 Вт протягом дня і ночі з вимірюваннями: (а) напруги акумулятора, (b) струму акумулятора, (c) вихідної напруги інвертора.

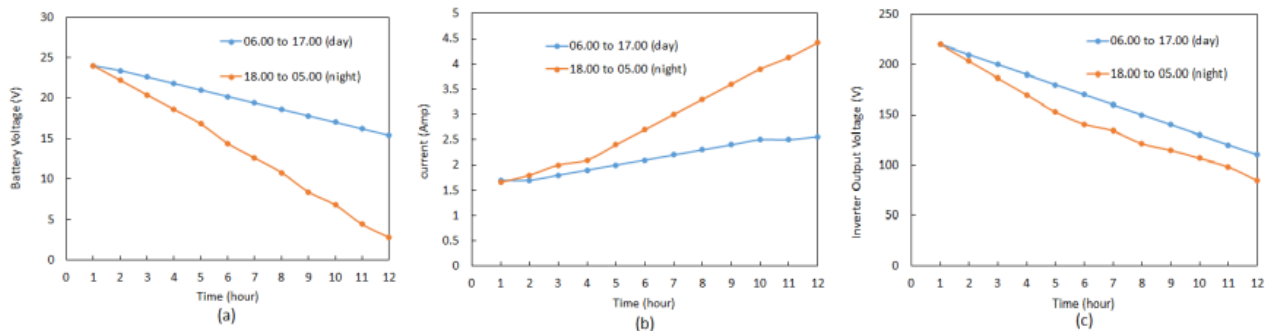


Рисунок 3.6 – Демонструє здатність акумулятора підтримувати навантаження АС 200 Вт протягом дня і ночі з вимірюваннями: (а) напруги акумулятора, (b) струму акумулятора, (c) вихідної напруги інвертора

Принцип роботи автономної сонячної електростанції (PLTS) полягає у перетворенні сонячної теплової енергії в електричну за допомогою сонячних панелей, після чого вона зберігається в акумуляторах. Для перетворення 24-вольтової постійної напруги від акумулятора в змінну напругу 220 В використовується інвертор. При розподілі струму та напруги від сонячних панелей загальна напруга в послідовному з'єднанні становить приблизно 30,2 В, але процес зарядки акумулятора залишається стабільним із середнім значенням 24,5 В. Весь розподіл регулюється сонячним контролером заряду (SCC). Напруга та струм починають зростати з 06:00 до 10:00 WIB, досягаючи

максимуму в період з 10:00 до 12:00 WIB, після чого поступово зменшуються до вечора.

Недоліком цієї системи сонячних батарей є недостатня ефективність у змінних погодних умовах. У сонячну погоду процес зарядки проходить дуже добре, однак ефективність значною мірою залежить від характеристик конкретного типу сонячних батарей.

Для подальшого вдосконалення системи, з метою отримання більшої кількості енергії, рекомендується встановити автоматичну систему відстеження сонця, яка дозволить орієнтувати панелі відповідно до напрямку сонячного світла. Розроблена система дозволяє використовувати електроенергію, отриману з сонячних джерел, для електростанцій, а також для живлення водяних насосів. Перетворення електроенергії з постійного струму (DC) у змінний струм (AC) не досягає 100% ефективності, оскільки під час конверсії відбуваються втрати. Віней (2015) повідомив, що ефективність перетворення DC у AC в реальних умовах становить приблизно 82-89% [2].

Сонячні панелі можуть як постачати електроенергію, так і накопичувати її в акумуляторах. Управління процесами збереження та використання енергії здійснюється за допомогою сонячного контролера заряду (SCC).

Накопичена електроенергія використовується для живлення освітлення та електродвигунів через інвертор, який перетворює її у змінну напругу 220 В з частотою 50 Гц. На рисунку 3.6 показано здатність акумулятора підтримувати навантаження потужністю 200 Вт змінного струму як удень, так і вночі. У денний час напруга та сила струму є вищими, оскільки висока сонячна інсоляція може збільшувати вихідну потужність [7].

3.6 Аналіз динамічної реакції сонячного шлюзу: пристрій для запобігання нульового експорту електроенергії у фотоелектричних системах генерації

Підключені до мережі фотоелектричної системи дозволяють власникам відновлюваних енергетичних установок експортувати електроенергію, якщо її

вироблено більше, ніж споживається. Децентралізована генерація може принести низку переваг для розподільної мережі, зокрема [6-9]:

Зменшення втрат при передачі електроенергії, Відтермінування інвестицій у розширення пропускної здатності ліній електропередач, покращення якості електроенергії в слабких лініях живлення. З іншого боку, децентралізована генерація може створювати певні проблеми для розподільних мереж, такі як: ризик утворення "острівних" режимів роботи, складність виявлення та ізоляції пошкоджень, небажаний вплив на гармонійний склад напруги [10-11]. Щоб вирішити зазначені проблеми, були розроблені та опубліковані стандарти, що охоплюють наступні аспекти відновлюваних енергетичних систем:

ДСТУ 4777.1-2002 – Підключення енергосистем до мережі через інвертори – Вимоги до монтажу,

ДСТУ 4777.2-2002 – Підключення енергосистем до мережі через інвертори – Вимоги до інверторів.

Крім того, з 1 липня 2014 року Україна, запровадила нові стандарти для власників сонячних електростанцій, які хочуть підключитися до мережі [8]. Нові вимоги також поширюються на інші малі генераційні установки, такі як мікровітroeлектростанції та мікрогідроелектростанції. Основною причиною змін стало швидке поширення сонячних електростанцій, для яких інфраструктура мережі поки що не готова до такого рівня розповсюдження.

У багатьох країнах електрогенеруючі установки на основі сонячної енергії підпорядковуються суворим нормативним обмеженням щодо подачі електроенергії в мережу [12-14]. Таким чином, без системи управління енергією: фотоелектричні системи можуть бути заборонені до підключення, якщо їм не дозволено передавати електроенергію в мережу або їхній розмір може бути обмежений, якщо дозволений експорт електроенергії становить 0 Вт.

Тому у роботі, представлено принцип роботи, метод управління та динамічну реакцію пристрою Solar Gate, розробленого компанією Magellan Power, щоб підтвердити точність і можливості цього пристрою при роботі протягом типового дня з використанням інвертора Power-One Aurora Trio.

В таблицях 3.1 і 3.2 містять вимоги до підключення інтегрованих енергосистем (IES) компаній Ergon та Energex для інверторів потужністю до 30 кВА, а також налаштування обмеження потужності реле зворотного потоку. Це реле нульового експорту запобігає подачі електроенергії в мережу. Пристрій містить спеціальне зовнішнє реле захисту мережі, тоді як у компактній конфігурації ця функція інтегрована всередину Solar Gate.

Таблиця 3.1 – Налаштування обмеження потужності (режим без експорту) [12]

Параметр	Значення
Граничний рівень зворотної потужності	1 % від номінальної потужності інвертора
Чітка затримка за часом	5 сек.

Таблиця 3.2 – Вимоги до підключення IES від Ergon Energy для інверторів потужністю до 60 кВА [12]

Номінальна потужність інвертора	Обмеження потужності
<2,0 кВА	Експорт: Н/Д
	Без експорту: Н/Д
>2,0 – 3,5 кВА	Експорт: НІ
	Без експорту: Через інвертор або пристрій нульового експорту
>3,5 – 5 кВА	Експорт: НІ
	Без експорту: Через інвертор або пристрій нульового експорту
>5,0 – 10 кВА (3 фази)	Експорт: НІ
	Без експорту: Через інвертор або пристрій нульового експорту
>10 – 30 кВА (3 фази)	Експорт: НІ
	Без експорту: Через інвертор або пристрій нульового експорту

Архітектура системи Solar Gate

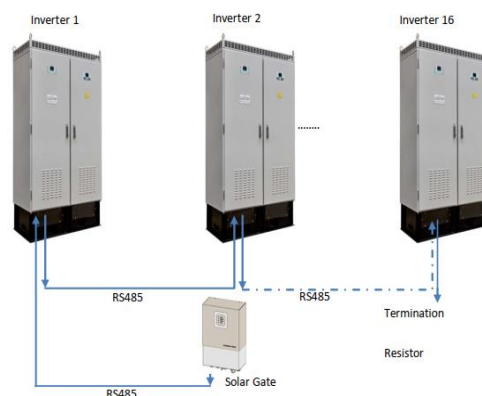


Рисунок 3.7 – Типове підключення Solar Gate до інверторів через шину зв'язку RS485.

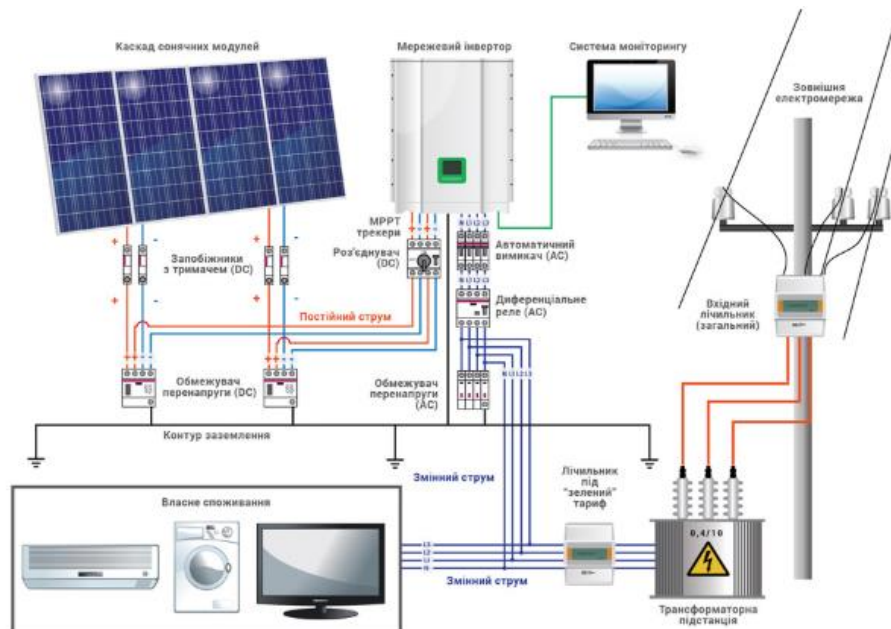


Рисунок 3.8 – Схема Solar Gate у “компактній конфігурації”.

На рис. 3.8 представлена блок-схема Solar Gate у компактній конфігурації системи. Solar Gate підключається до інверторів фотоелектричної системи через комунікаційну шину RS485, автоматично визначає розмір сонячної електростанції, моніторить у реальному часі потоки потужності між мережею та інверторами, обчислює миттєву потужність навантаження та масштабує її відповідно до допустимого рівня експорту, необхідного запасу безпеки та розміру електростанції, передає ці дані інверторам через RS485 для обмеження їхньої максимальної вихідної потужності.

Крім того, Solar Gate може виконувати функцію захисту від зворотного потоку, безпосередньо керуючи контактором, який відключає вихід сонячної електростанції, якщо виявлено подачу електроенергії назад у мережу. Ця функція забезпечує резервний захист у разі проблем з передачею даних між Solar Gate та сонячною електростанцією.

Конфігурація для станцій >60 кВт

На рис. 3.9 показана повна схема системи Solar Gate для сонячних електростанцій потужністю понад 60 кВт.

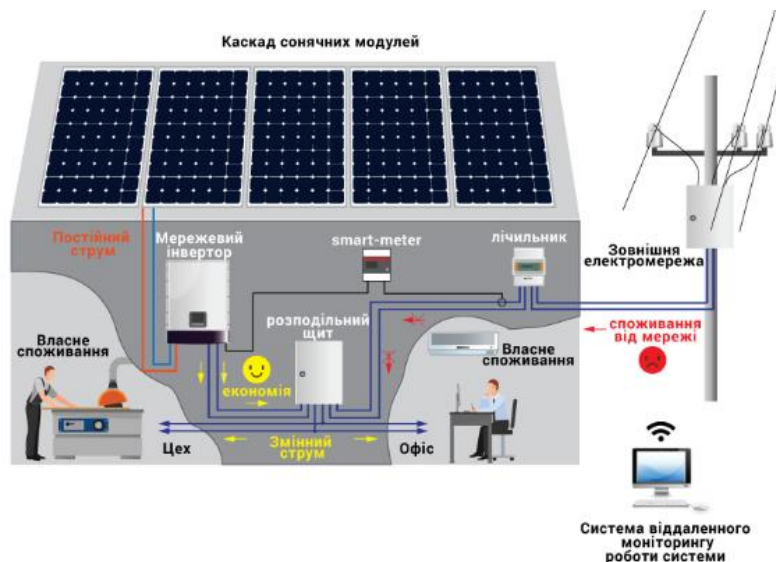


Рисунок 3.9 – Схема Solar Gate у “повній конфігурації”.

Як і в компактній конфігурації Solar Gate підключається до інверторів через RS485 та автоматично визначає розмір електростанції, моніторить миттєву потужність навантаження, масштабує її згідно з дозволеним рівнем експорту, запасом безпеки та потужністю станції.

Такий підхід забезпечує автоматичне управління генерацією та виключає ризики зворотного потоку енергії в мережу.

Апаратні компоненти системи показані на рис. 3.10 – 3.12. Однією з головних переваг Solar Gate є відсутність потреби у зовнішньому датчику потужності, ПЛК (програмованому логічному контролері) та програмуванні, оскільки він повністю інтегрований.

Слід зазначити, що компанія Energex надала цьому підходу попереднє схвалення для сонячних систем потужністю 60 кВт і він не потребує окремого реле захисту від зворотного потоку потужності.

Щоб перевірити здатність Solar Gate контролювати та запобігати експорту енергії, було обрано комерційний інвертор Aurora Trio. Тести проводилися для деяких типових навантажень з метою демонстрації можливостей пристрою та розрахунку динамічної реакції Solar Gate (Рис. 3.14–3.16).



Рисунок 3.10 – Апаратні компоненти Solar Gate



Рисунок 3.11 – Інвертор Power-One і з'єднання між Solar Gate та інвертором

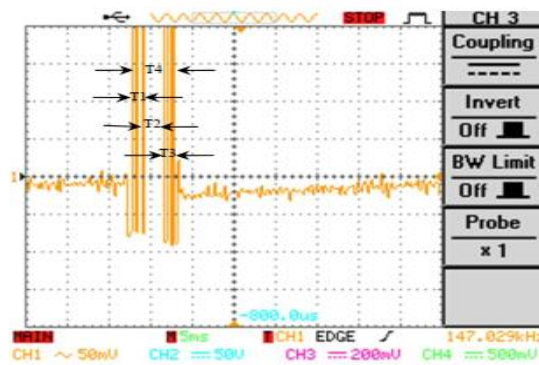


Рисунок 3.12 – Сигналізація між Solar Gate та інвертором Aurora Trio за допомогою RS485

Рисунок 3.13 показує сигналізацію RS485 між Solar Gate та інвертором Powerone Aurora Trio. Вона складається з запиту Solar Gate на вимірювання вихідної потужності від інвертора та відповіді T1. Є коротка затримка T2 перед відправкою наступного запиту. Потім Solar Gate надсилає команду обмеження потужності широкомовного типу T3. Отже, затримка для опитування N інверторів буде $(T1+T2)*N+T3$. Оскільки T1 ~2,5 мс, T2 ~2,5 мс, T3 ~2,5 мс, найгірший час виконання для 16 інверторів становить $16 \times 5 + 2,5 = 82,5$ мс.

Рисунок 3.14 показує коливання навантаження для серії тестових навантажень. Тест проводився з 12:00 до 13:00. Були застосовані різні типи навантажень, такі як кондиціонери, освітлення в офісах та на виробництві.

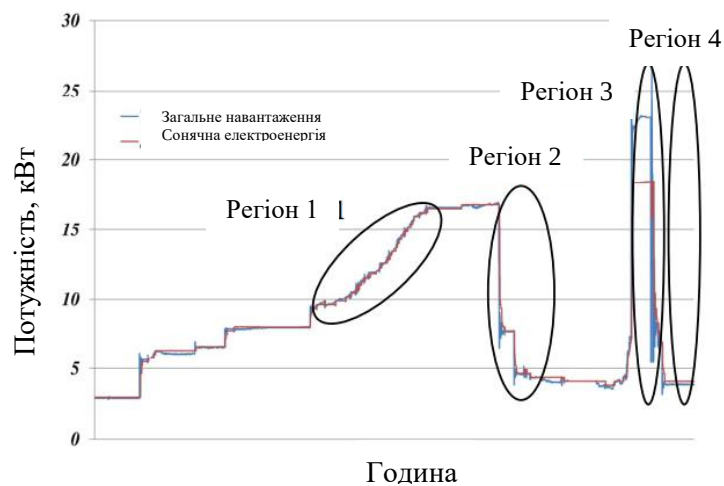


Рисунок 3.13 – Результати тестування для серії тестових навантажень

Згідно з рис. 3.14, можна побачити, що для плавної зміни навантаження (Область 1) вихід інвертора слідує за змінами навантаження.

Крім того, перша ступінчаста реакція на рис. 3.15 показує, що навантаження на об'єкті зменшується приблизно вдвічі з 17 кВт до ~7 кВт. **Solar Gate** відреагував і надав команду інвертору відповідно зменшити вихідну потужність, що він починає робити після затримки в 5 секунд. Загальний час для зменшення потужності інвертора становить приблизно 15 секунд.

Подібна ситуація спостерігається на рис. 3.15, коли навантаження на об'єкті раптово потроюється з ~7 кВт до ~23 кВт. Інвертор відстає від запиту приблизно на 5 секунд. Сонячний вихід не може відповідати навантаженню, тому він видає максимальну потужність лише ~17 кВт.

Крім того, на рис. 3.16 показано швидко змінюваний профіль навантаження і відповідний сонячний вихід, оскільки система намагається слідувати за ним. Затримка в реакції інвертора знову помітна, оскільки він перевищує та не досягає потрібних значень при відстеженні піків та провалів. У всіх трьох рисунках видно роздільну здатність управління потужністю на рівні 1%.

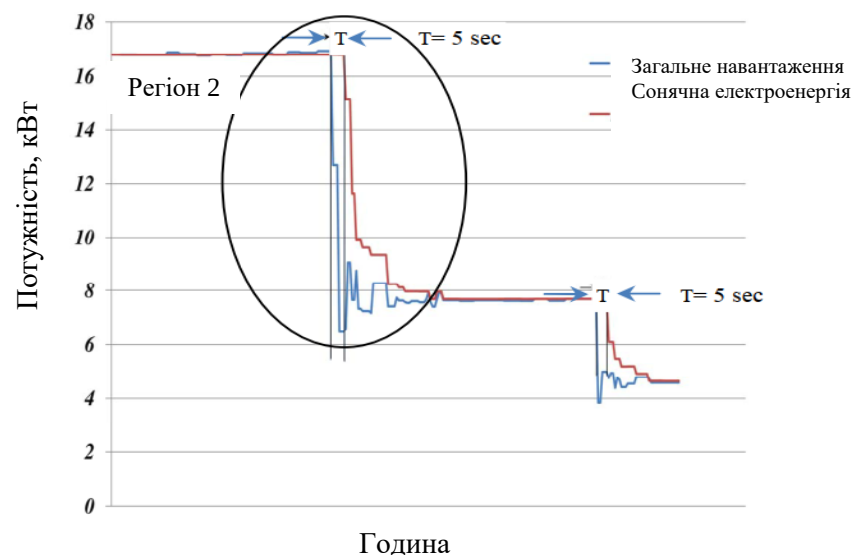


Рисунок 3.14 – Результати тестування для ступінчатого зменшення навантаження на 50%.

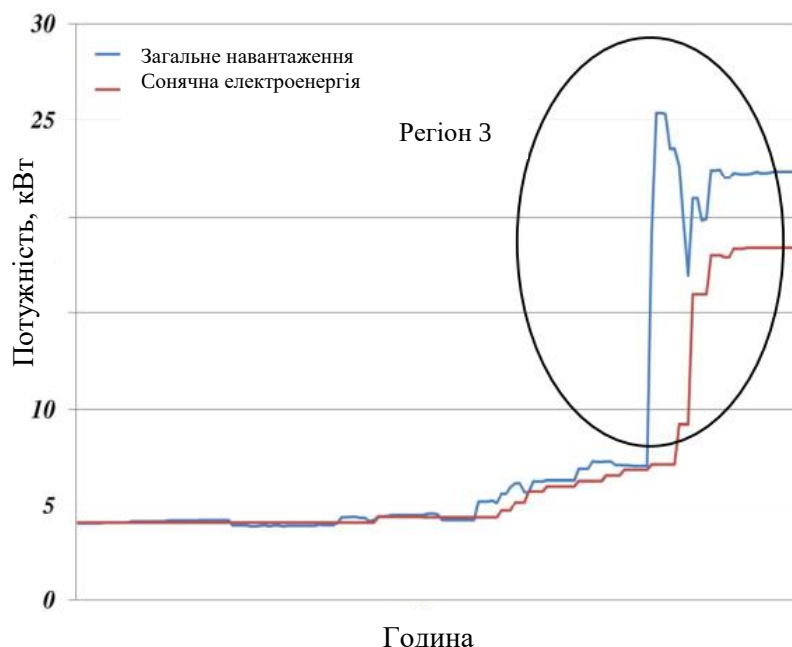


Рисунок 3.15 – Результати тестування для ступінчатого збільшення навантаження на 30%.

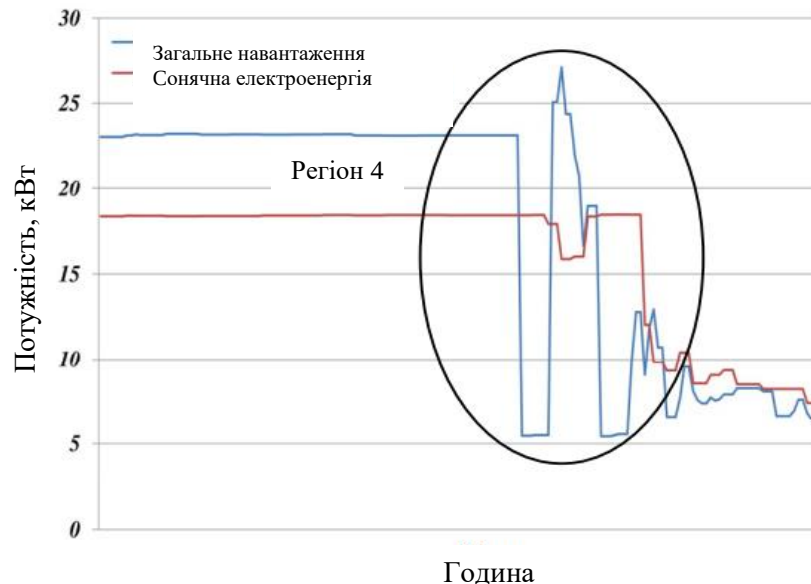


Рисунок 3.16 – Результати тестування для швидко змінюваного навантаження.

Отже в роботі представлено нове обладнання для контролю генерованої потужності сонячними інверторами, що відповідає вимогам енергетичних компаній. Solar Gate контролює вихідну потужність інверторів, щоб переконатися, що вона не перевищує споживану потужність на об'єкті.

Для оцінки динамічної реакції Solar Gate та інвертора на зміни навантаження були проведені лабораторні тести на Solar Gate. Згідно з отриманими результатами для інвертора PowerOne Aurora-Trio, можна побачити, що час вимірювання для Solar Gate складає менше 100 мс (для 16 інверторів). Загальний час реакції становить менше 5 секунд.

Отже, мінімальну затримку для реле захисту від зворотного потоку потужності рекомендується встановлювати більше 5 секунд.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля

Система управління охороною праці (СУОП) – це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових безпечних і високопродуктивних умов праці. За дану частину виробництва відповідає інженер з охорони праці. Головне завдання спеціаліста – створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням.

Для забезпечення створення СУОП щорічно розробляються та затверджуються на підприємстві положення про організацію управління охорони праці; щорічно оформляються накази про призначення осіб відповідальних за стан охорони праці на дільницях, а також безпечне використання об'єктів підвищеної небезпеки (котлів, що працюють під тиском, газових та кисневих балонів, пестицидів); оформляються наказ про визначення персональних обов'язків з охорони праці усіх спеціалізацій, керівників дільниць та інших службових осіб; щорічно проводиться паспортизація умов праці, технічних засобів безпеки і технічного стану робочих місць; складаються плани роботи з охорони праці, комплексне, річне і оперативне планування; організовуються заходи матеріального і морального стимулювання щодо охорони праці; проводяться розслідування і вивчення причин травм, пожеж їх аналіз і облік, а також розробляються заходи щодо їх застосування;

Об'єктом управління є діяльність структурних підрозділів та служб підприємства по забезпеченню безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виробничих дільницях, цехах та підприємства в цілому.

4.2 Протипожежна безпека і грозозахист

Блискавко захист – це комплекс захисних захистів від блискавки, які гарантують безпеку людей, збереження людей і споруд, обладнання та матеріалів від вибухів, загоряння й руйнування. Найпростішими і надійними засобами від блискавки є створення блискавковідводів. Схема блискавкозахисту будівлі показана на рис. 4.1.

Струмопровід виконується сталюю стрічкою перерізом 25...30 мм або дротом не менше 6 мм. Заземлення виконується кутовою сталлю, трубами на відстані від установки не менше 4,5 м. Опір розтікання не повинен перевищувати 15....20 Ом.

Приймаємо початкову висоту блискавковідводу 8 метрів. Визначаємо радіус конуса, в якому ймовірність попадання 95%, через висоту конуса h за формулою (4.1):

$$R_0 = 1.5 \cdot h, \text{ м. } R_0 = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ м.}$$

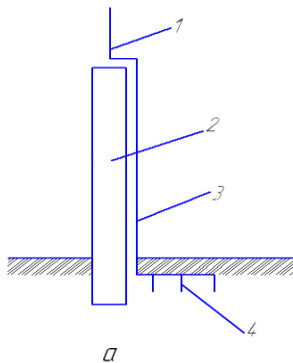


Рисунок 4.1 – Схема блискавко захисту конструкції; 1 – блискавко приймач,
2 – блискавко провідник; 3 – опора, 4 – заземлювач.

Для будинку довжиною L кількість одиночних блискавковідводів визначаємо через радіус конуса R_0 в якому ймовірність попадання 95% за формулою:

$$Nb = \frac{L}{2R_0}, \text{ шт.}, \quad Nb = \frac{86}{2 \cdot 4} = 11 \text{ шт.}$$

Усі з'єднання в процесі монтажу системи блискавко захисту (Блискавко приймач – струмовідвід, струмовід – заземлювач) виконують за допомогою зварювання. Болтові з'єднання застосовують лише для тимчасових блискавко захисних пристроїв.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З ТОЧКОЮ НУЛЬОВОГО ЕКСПОРТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

5.1 Обґрунтування економічної ефективності використання системи керування сонячною електричною станцією 60 кВт з точкою нульового експорту електроенергії

У роботі досліджено економічну доцільність використання системи керування сонячною електричною станцією з нульовим експортом електроенергії для підвищення ефективності експлуатації панелей. Проведені обчислення дозволили оцінити рентабельність впровадження таких рішень, а також обрати оптимальну методику оцінки ефективності через порівняння різних варіантів енергетичних установок. Зокрема, визначено вартість електроенергії для підприємств, організацій та інших користувачів за умовами "зеленого" тарифу, що забезпечує точність висновків щодо ефективності запропонованих заходів..

$$B_{ел} = E_{ел} \cdot C_{ел}, \quad (5.1)$$

де $E_{ел}$ – річне споживання електроенергії житловим будинком згідно зі статистичними даними [6], кВт·год; $C_{ел}$ – вартість 1 кВт·год електроенергії за умовами "зеленого" тарифу, грн.

Розміщення сонячних панелей із системою керування та фіксованим кутом ефективне, але для максимізації виробництва електроенергії найбільш ефективними є фотомодулі зі слідкуючими системами. Вони збільшують оптичний потік, що покращує використання енергетичного потенціалу сонячних батарей. Експерименти показали, що слідкуючі системи виробляють на 24% більше енергії порівняно з фіксованим кутом, що зменшує строк окупності панелей.

Вартість роботи визначається за формулою:

$$B_{\text{чт}} = (B_{\text{pv}} - I_{\text{п}}) \triangleright 0, \text{ грн.}, \quad (5.2)$$

де $B_{\text{pv}} = 41832 \text{ грн.}$ – поточна (дисконтована) вартість додаткових фінансових надходжень, отриманих упродовж усього періоду реалізації проекту;
 $I_{\text{п}} = 21271 \text{ грн.}$ – стартові інвестиційні витрати, необхідні для реалізації проекту;

$$B_{\text{чт}} = (41832 - 21271) = 20561 \text{ грн.} \triangleright 0$$

Показник прибутковості інвестицій:

$$\xi = \left(\frac{B_{\text{чт}}}{I_{\text{п}}} \right) = \left(\frac{41832}{21832} \right) = 1,92 \triangleright 1 \quad (5.3)$$

Строк повернення інвестицій розраховується на основі рівняння:

$$I_{\text{п}} \approx \sum_{t=1}^T B_{\text{чт}t} \quad (5.4)$$

$$21832 \approx 6713 + 6155 + 5711 + 5305 \cdot 0,62$$

$$\tau_{\text{ок}} = 3,62 \text{ року} \triangleleft \tau_{\text{м}} = 8 \text{ років} \quad (5.5)$$

Отже розрахований термін окупності не враховує потенційного зростання вартості електроенергії. Тому для більшої точності показника окупності необхідно здійснити перерахунок, який буде враховувати зміни в цінах на електричну енергію протягом періоду реалізації проекту.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Результатом цієї роботи є моніторинг, відстеження та керування фотоелектричною системою, тобто масивами сонячних панелей на сонячних електростанціях, зокрема відстеження значень напруги та струму. Ці параметри будуть передані на створену веб-сторінку за допомогою локальної мережі (LAN) або інтернет-з'єднання.

Запропонована робота спрямована на відстеження та моніторинг сонячних панелей із використанням IoT, при цьому відстеження може здійснюватися через хмарні технології. Це дозволяє обробляти дані та керувати панелями віддалено. Моніторинг здійснюється через контролер із використанням фреймворку Flask як інтерфейсу. Фізичні пристрої не підключені безпосередньо до системи, але можуть керуватися віддалено через інтернет-з'єднання.

Розумне відстеження або моніторинг сонячних електростанцій сприятиме значному зростанню використання відновлюваної енергії в сонячній енергетиці. Це допоможе користувачам аналізувати споживання енергії, його вплив на використання відновлюваних джерел енергії та вирішення енергетичних питань на сонячних електростанціях.

В роботі представлена програмна реалізація запропонованого методу. Всі дані можуть бути віддалено доступні користувачам через створену веб-сторінку. Запропонований підхід дозволить підвищити ефективність сонячних електростанцій для генерації більшої кількості енергії.

Сонячна енергія стала одним із найкращих альтернативних ресурсів для задоволення потреб у електроенергії. Обрана для впровадження сонячна електростанція має потужність 60 кВт і генерує 150000 кіловат-годин електроенергії на рік, використовуючи полікристалічну технологію сонячних панелей.

Наразі ця електростанція контролюється за допомогою PLC (програмованого логічного контролера). Усі записи щодо вироблення енергії можна переглядати лише на місці через пристрій SCADA.

У запропонованій роботі ми розробили модель онлайн-моніторингу та керування сонячною електростанцією, щоб уповноважена особа могла контролювати або керувати панелями віддалено, навіть із дому. Залежно від змін у атмосферних або погодних умовах, користувач також зможе керувати сонячними панелями.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2008. 135 с.
2. Гальчак В. П., Дмитрів Г. М. Розрахунок енергетичних параметрів гібридної системи теплопостачання фермерського будинку. Метод. вказівки до виконання курсового проекту. Львів, ЛДАУ, 2005. 36 с.
3. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. Львів: "Магнолія 2006", 2008. 188 с.
4. Жуковський С. С., Лабай В. Й. Системи енергопостачання і забезпечення мікроклімату будинків та споруд: Навч. пос. для ВЗО. Львів: Астрономо-геодезичне товариство, 2000. 259 с.
5. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.
6. Кудря С. О., Головка В. М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2011. 184 с.
7. Малярєнко В. А. Основи теплофізики будівель та енергозбереження. Підручник. 2-е видання. Х.: Видавництво САГА, 2010. 484 с.
8. Малярєнко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс. Х.: В-во САГША, 2008. 320 с.
9. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.
10. <https://uniclimate.com.ua/products/teplovi-nasosy-dlya-pryvatnogo-budynku/cooperhunter-unitherm-3-all-in-one-ch-hp12wtsirk3/>
11. <https://uniclimate.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/instrukciya-unitherm3-aio-ua.pdf>

12. https://cooperhunter-aircon.com/?gclid=Cj0KCQjw7aqkBhDPArisAKGa0oLWwriPnZqdYFkAdTEGwILGKZiUW6zYhudeqKqlb11QuAZmcjiDyL0aAqmlEALw_wcB
13. R. K. Sarojini, K. Palanisamy and E. De Tuglie, “A fuzzy logic- based emulated inertia control to a supercapacitor system to improve inertia in a low inertia grid with renewables,” *Energies*, Vol. 15, no. 4, Article ID 1333, 2022.
14. O. Abdel-Rahim and E. Abdelhameed, “Ultimate transformerless boost DC-DC converter for renewable energy applications,” *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, Vol. 2, no. 2, pp. 63–69, 2021.
15. J. B. Holm-Nielsen, and D. Almakhlles, “A hybrid PV-battery system for ON-grid and OFF-grid applications-controller in loop simulation validation,” *Energies*, Vol. 13, No. 3, P. 755, 2020.
16. V. Burlaka, S. Gulakov, S. Podnebennaya, E. Kudinova, and O. Savenko, “Bidirectional single stage isolated DC-AC converter,” in *Proceedings of the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, PP. 343–346, IEEE, Kharkiv, Ukraine, 2020, October.
17. S. Deshmukh, A. R. Thorat, and I. Korachagaon, “Modelling and analysis of PV standalone system with energy management scheme,” in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, PP. 1–5, IEEE, Bangalore, India, 2020, July.
18. K. Amer, M. Fakher, S. Ahmad, M. Irhouma, S. Altafbao and E. Salem, “Performance of domestic solar heating system with thermal storage using phase change materials,” *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 16, no. 9, PP. 01–11, 2020.
19. E. S. Harsha, R. K. Nema, S. Nema, and R. D. Kulkarni, “Design & Simulation of high gain ratio Bidirectional converter for energy storage applications,” in *Proceedings of the 2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*, pp. 1–6, IEEE, Keonjhar, India, 2020, July.

20. Y. Nassar, S. Alsadi, K. Amer, A. Yousef, and M. Fakher, “Numerical analysis and optimization of area contribution of the PV cells in the PV/T flat-plate solar air heating collector,” *Solar Energy Research Update*, Vol. 6, PP. 43–50, 2019.
21. M. Schroeder and J. Jaeger, “Advanced energy flow control concept of an MMC for unrestricted operation as a multiport device,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, №. 11, PP. 11–496, 2019.
22. M. S. Chinthavali, J. Sun, P. R. V. Marthi, S. Chinthavali, S. Lee and M. Elizondo, *Models and Methods for Assessing the Value of HvdC And Mvdc Technologies in Modern Power Grids*, Pacific Northwest National Lab, United States, May 2019.
23. S. Yassin Alsadi and Y. Fathi Nassar, “A general expression for the shadow geometry for fixed mode horizontal, step-like structure and inclined solar fields,” *Solar Energy*, Vol. 181, PP. 53–69, 2019.
24. H. Bayat and A. Yazdani, “A hybrid MMC-based photovoltaic and battery energy storage system,” *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 6, №. 1, PP. 32–40, 2019.
25. M. Kumar, “Solar PV based DC microgrid under partial shading condition with battery- Part 2: energy management system,” in *Proceedings of the 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, PP. 1–6, IEEE, Jaipur, India, 2018, December.

ДОДАТОК

А.1 Загальний вигляд сонячної електро станції ТзОВ «ФАВОРИТ-АГРО» 60 кВт

