

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.311.1:631.234.8.03(477.41)

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

_____ /Антипов
Є.О./

«_____» _____ 2025 р.

_____ (підпис)
«_____» _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Енергопостачання тепличного господарства НДГ “Ворзель” з використанням поновлювальних джерел енергії»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Кривонос В.Є.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Горобець В.Г.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Савлук М.М.
(ПІБ)

КИЇВ – 2025
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

к.т.н. доцент _____ Антипов Є.О.
 (ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
 « ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Савлуку Михайлу Михайловичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
 (код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 (назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
 (освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Енергопостачання тепличного господарства НДГ “Ворзель” з використанням поновлювальних джерел енергії» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 26.09.2024 № 1665”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.05.15
 (рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: енергетичні потреби тепличного господарства, кліматичні умови, інсоляція протягом року, технічна документація установок

Перелік питань, що підлягають дослідженню: 1. Аналіз сучасних тенденцій у сфері енергозабезпечення тепличних господарств; 2. Аналіз сучасних моделей енергопостачання теплиць; 3. Визначення теплових та електричних навантажень тепличного комплексу; 4. Розрахунок потужності поновлювальних джерел енергії для забезпечення потреб теплиці; 5. Аналіз енергоефективності та економічної доцільності запропонованої системи; 6. Розробка заходів з охорони праці та екологічної безпеки.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання 26.09.2024 р.

Керівник магістерської роботи _____
 (підпис)

Горобець В.Г.
 (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____

Савлук М.М.

(підпис)

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена створенню системи енергозабезпечення тепличного господарства Навчально-дослідного господарства «Ворзель» із використанням поновлювальних джерел енергії. Об'єкт дослідження — теплиця площею 2500 м², яку запроєктовано з нуля в умовах відсутності існуючої інфраструктури, зруйнованої внаслідок тимчасової окупації.

Загалом робота складається з 87 сторінок, налічує 2 рисунки, 4 таблиці, 35 бібліографічних найменування за переліком посилань.

У першому розділі проведено огляд наукових підходів до створення автономних енергетичних систем для тепличного господарства, сформульовано основні теоретичні поняття та математичні моделі, що описують енергетичні процеси в теплицях

У другому розділі проаналізовано сучасні практики енергозабезпечення теплиць в Україні та за кордоном. Проведено порівняльну характеристику поновлюваних джерел енергії — сонячної, вітрової, біоенергетики, геотермальної енергії та теплових насосів — з позиції їх ефективності, доступності та доцільності застосування у вітчизняних умовах.

У третьому розділі здійснено проєктування гібридної енергосистеми для теплиці в НДГ «Ворзель». Проаналізовано кліматичні умови регіону, визначено теплові та електричні навантаження, обґрунтовано вибір джерел енергії та обладнання (сонячні панелі, теплові насоси, біогазова установка, сонячні колектори). Виконано розрахунок потужностей, складено енергетичний баланс і запропоновано стратегії оптимізації її роботи протягом року.

У четвертому розділі проведено економічне обґрунтування проєкту. Визначено капітальні та експлуатаційні витрати, строк окупності, чисту приведену вартість (NPV), внутрішню норму прибутковості (IRR) та інші

показники ефективності. Також здійснено порівняння з альтернативними джерелами енергії.

У п'ятому розділі проаналізовано ризики, пов'язані з експлуатацією енергетичного обладнання в аграрному середовищі, запропоновано заходи з охорони праці, а також визначено основні вимоги до екологічної безпеки та контролю.

Результати дослідження демонструють, що впровадження гібридної енергетичної системи з поновлювальних джерел дозволяє забезпечити автономне, надійне та економічно вигідне функціонування тепличного комплексу в умовах Київської області.

Ключові слова: тепличне господарство, поновлювані джерела енергії, енергобаланс, фотоелектрична система, біогаз, тепловий насос, енергоефективність, окупність.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Огляд наукових підходів до автономних енергосистем у тепличному господарстві	10
1.2 Основні теоретичні засади: визначення ключових понять і моделей	11
1.3 Методологія дослідження: інструменти енергетичного моделювання, економіко-математичні та системні підходи	14
Висновки до розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПРАКТИК ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛИЧНИХ ГОСПОДАРСТВ.	18
2.1 Аналіз існуючих моделей енергопостачання в теплицях	18
2.2 Класифікація й характеристика поновлюваних джерел енергії	20
Продовження таблиці 2.1	26
2.3 Міжнародний досвід впровадження ВДЕ в тепличних системах	26
Висновки до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ПДЕ ДЛЯ ТЕПЛИЦІ НА 2500М ²	35
3.1. Кліматичні умови регіону й оцінка енергетичних потреб теплиці	35
3.2. Вибір поновлюваних джерел і характеристика обладнання	41
3.3 Схема системи, режими роботи та інтеграція компонентів	44
3.4 Розрахунок потужностей і складання енергетичного балансу	49
3.5 Оптимізація роботи системи з урахуванням сезонних коливань	55
Висновки до розділу 3	57
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ	59
4.1 Методика економічного аналізу інвестицій	59
4.2 Розрахунок строку окупності та основних витрат	61
4.3 Порівняння з традиційними джерелами енергії	67

Висновки до розділу 4	70
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА	72
5.1 Оцінка ризиків і заходи з охорони праці	72
5.2 Екологічний контроль і технічний нагляд	77
Висновки до розділу 5	80
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АКБ	–	Акумуляторна батарея
АСУ	–	Автоматизована система управління
CAPEX	–	Capital Expenditures — капітальні витрати
CHP	–	Combined Heat and Power — когенерація тепла і електрики
COP	–	Coefficient of Performance — коефіцієнт перетворення
DCF	–	Discounted Cash Flow — дисконтований грошовий потік
IRR	–	Internal Rate of Return — внутрішня норма прибутковості
ККД	–	Коефіцієнт корисної дії
LCOE	–	Levelized Cost of Energy — рівень собівартості енергії
NPV	–	Net Present Value — чиста приведена вартість
OPEX	–	Operational Expenditures — операційні витрати
PI	–	Profitability Index — індекс рентабельності
ПЛК	–	Програмований логічний контролер
PV	–	PhotoVoltaic — фотоелектричні модулі
SoC	–	State of Charge — стан заряду акумулятора
СФЕС	–	Сонячна фотоелектрична станція
ВДЕ	–	Відновлювані джерела енергії
НДГ	–	Навчально-дослідне господарство

ВСТУП

Сучасні тепличні комплекси зіштовхуються з двома ключовими проблемами: зростання цін на енергоносії та ризик їх перебоїв, а також нагальна потреба у суттєвому зменшенні викидів парникових газів, як це передбачено міжнародними кліматичними зобов'язаннями. Науково-виробниче об'єднання «Ворзель» поблизу Києва, яке вже мало позитивний досвід вирощування овочів, опинилося в епіцентрі цих викликів. Після тимчасової окупації підприємство втратило здатність функціонувати, а його інфраструктура була повністю знищена. Сьогодні це місце нагадує будь-яке інше чисте поле.

Відновлення тепличного виробництва у Ворзелі є надзвичайно важливим як з точки зору економіки, так і з соціальної перспективи. Проте використання традиційних методів опалення та освітлення, які вимагають значних витрат на енергію, більше не є раціональним. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відкривають нові горизонти, поєднуючи стабільне енергопостачання з низькими експлуатаційними та екологічними витратами. Передові технології - від сонячних колекторів до біогазових установок і теплових насосів - довели свою ефективність у підтримці оптимального мікроклімату в теплицях, скороченні споживання традиційних паливно-енергетичних ресурсів та зменшенні викидів шкідливих речовин.

Метою цієї роботи є створення теоретичної моделі автономної системи енергозабезпечення теплиці площею 2500 м² на основі відновлюваних джерел енергії, адаптованої до кліматичних умов Київської області та економічних обмежень проекту, що допоможе відновити функціонування фермерського господарства відповідно до сучасних принципів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- Провести системний аналіз світового та українського досвіду застосування відновлюваних джерел у тепличних господарствах.
- Проаналізувати кліматичні умови регіону та визначити енергетичні потреби майбутньої теплиці.

- Обґрунтувати вибір оптимальних видів відновлюваних джерел енергії та відповідного обладнання, використовуючи техніко-економічні критерії.
- Розробити схему інтеграції обраних технологій в єдину адаптивну мережу.
- Здійснити моделювання потужностей, скласти енергетичний баланс та запропонувати стратегії оптимізації з врахуванням сезонних коливань.
- Оцінити економічну ефективність інвестицій та термін окупності проекту.
- Розробити рекомендації з охорони праці та екологічної безпеки.

Методологічно дослідження базується на поєднанні системного аналізу, енергетичного моделювання та економіко-математичних методів. У дослідженні використані статистичні дані метеостанцій, технічні характеристики сучасного обладнання та результати натурних спостережень. Наукова цінність полягає в комплексному підході до створення автономної енергетичної системи для сучасної теплиці «під ключ» – від аналізу ресурсів до економічної оцінки інвестицій.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд наукових підходів до автономних енергосистем у тепличному господарстві

В сучасних наукових колах під автономними енергетичними системами розуміють взаємопов'язаний комплекс технологій та інженерних рішень, що здатен задовольнити потреби споживачів з мінімальним залученням зовнішніх джерел енергії на основі відновлюваних джерел та власних ресурсів. Щодо тепличного господарства, це означає об'єднання сонячних колекторів, панелей, вітрогенераторів, біогазових установок, теплових насосів і систем накопичення енергії в єдину мережу, яка автономно забезпечує оптимальні мікрокліматичні умови.

Першим можливим підходом до побудови таких систем є модульна схема: різні ВДЕ встановлюються в окремих блоках, кожен з яких відповідає за свою ділянку (тепловий насос для опалення, сонячні панелі для освітлення, біогаз для пікових навантажень). Перевагою такого підходу є гнучкість і можливість поетапного впровадження, але він вимагає складних алгоритмів управління для узгодження роботи різноманітного обладнання.

Іншим розповсюдженим підходом є проектування синергетичних систем, де різні джерела енергії поєднуються не лише навколо центру споживання, але й з метою оптимізації загального енергетичного потоку. Наприклад, відпрацьоване тепло від біогазової установки може бути використане для живлення теплових насосів, а надлишок електроенергії від сонячних панелей зберігається в акумуляторах або використовується для виробництва водню. Такий підхід підвищує загальну ефективність системи та зменшує втрати при передачі електроенергії.

За кордоном спостерігається тенденція до впровадження інтелектуальних платформ управління енергоспоживанням, які використовують штучний

інтелект та машинне навчання для прогнозування споживання енергії та погодних умов. У поєднанні з сенсорними системами IoT вони дозволяють регулювати режими роботи обладнання в реальному часі, забезпечуючи баланс між виробництвом, споживанням та зберіганням енергії.

Класичні наукові дослідження передбачають енергетичне моделювання тепличної установки на основі динамічних симуляцій (MATLAB/Simulink, TRNSYS, HOMER), куди вводяться метеорологічні дані та характеристики обладнання, а також отримуються часові ряди виробленої та спожитої енергії. Ці моделі дозволяють оцінити продуктивність системи за різних сценаріїв (хмарність, температура, добове навантаження) і підібрати оптимальні параметри для батарей, теплових акумуляторів та резервних джерел.

Більш просунуті підходи поєднують системний аналіз з методами оптимізації надійності та витрат. Вони враховують не лише технічні показники, але й фінансові ризики та вплив на довкілля, формуючи загальний індекс ефективності проекту. Одним із прикладів є використання моделей багатокритеріальної оптимізації (MCDM), які допомагають вибрати найкращу комбінацію технологій, враховуючи вагу економічних, екологічних та експлуатаційних факторів.

Таким чином, наукові підходи до створення автономних енергетичних систем у тепличному господарстві еволюціонували від простих модульних схем до складних інтегрованих платформ з використанням інтелектуальних алгоритмів та методів багатокритеріальної оптимізації. Саме поєднання цих ідей дозволяє створити ефективну, гнучку та стабільну архітектуру енергозабезпечення, яку ми адаптуємо до умов НДГ «Ворзель».

1.2 Основні теоретичні засади: визначення ключових понять і моделей

У межах даного дослідження автономна енергосистема розглядається як сукупність технологічних елементів та програмно-апаратних засобів, що здатна

забезпечувати тепличне господарство необхідним обсягом теплової та електричної енергії, мінімізуючи залежність від зовнішніх мереж. Структура такої системи передбачає відновлювані джерела енергії, зокрема фотоелектричні панелі, сонячні колектори, теплові насоси та біогазові установки, а також компоненти зберігання енергії (електричні акумулятори та теплові акумулятори) і систему управління, яка забезпечує ефективний розподіл енергоресурсів.

Теплотехнічна модель енергосистеми спирається на рівняння теплового балансу, що відображає зміни температурного режиму теплиці під впливом теплових потоків. У цій моделі кількість тепла, яке надходить від сонячного випромінювання та джерел відновлюваної енергії (ВДЕ), порівнюється з тепловими втратами через огороджувальні конструкції, що обчислюються за традиційною формулою:

$$Q = UA(T_{\text{внутр}} - T_{\text{зовн}}) \quad (1.1)$$

Q — кількість тепловтрат, Вт (теплова потужність, яка втрачається через огороджувальні конструкції);

U — коефіцієнт теплопередачі конструкції, Вт/(м²·°С);

A — площа огороджувальної конструкції (стіна, дах, вікно тощо), м²;

$T_{\text{(внутр)}}$ — температура повітря всередині теплиці, °С;

$T_{\text{(зовн)}}$ — температура повітря зовні (зовнішнє середовище), °С.

Інтегрування цього рівняння протягом доби або сезону дає змогу оцінити необхідний обсяг додаткового тепlopостачання від теплових насосів або колекторів.

Модель фотоелектричного генератора описується через взаємозв'язок виробництва електричної енергії з інсоляцією, температурою та характеристиками панелей. У спрощеному вигляді його потужність визначається як результат множення інсоляційного потоку G , площі панелей APV та їхньої ефективності:

$$P_{PV} = G \cdot A_{PV} \cdot \eta_{PV} \quad (1.2)$$

P_{PV} — генерована потужність сонячною панеллю, Вт;

G — інсоляція (потік сонячної радіації на поверхню), Вт/м²;

A_{PV} — площа фотоелектричних панелей, м²;

η_{PV} — ККД фотоелектричних модулів (ефективність перетворення сонячної енергії в електричну), частка або %.

Більш деталізовані моделі враховують температурний коефіцієнт потужності та вплив часткового затінення, що дозволяє проводити більш точне моделювання добових графіків виробництва.

Накопичення енергії реалізується за допомогою батарей та теплоаккумуляторів, стан заряду яких описується рівнянням SoC (State of Charge). Зі збільшенням надходження енергії від ВДЕ відбувається заряд акумуляторів з ККД $\eta_{заряд}$, тоді як під час споживання ресурс віддається з ККД розряду $\eta_{розряд}$. Ця модель дозволяє симулювати цикли заряджання-розряджання протягом доби та визначити оптимальні ємності накопичувачів для досягнення автономності.

Постановка задачі оптимізації полягає в мінімізації загальних капітальних та операційних витрат при забезпеченні заданого рівня енергозабезпечення. Вона визначає цільову функцію у вигляді:

$$\min(\text{Скап} + \text{Секспл}) \quad (1.3)$$

Скап — капітальні витрати (від англ. CAPEX), тобто початкові інвестиції у встановлення системи;

Секспл — експлуатаційні витрати (від англ. OPEX), витрати на обслуговування, ремонт, паливо, електроенергію тощо;

$\min(\dots)$ — оператор мінімізації, тобто шукається таке поєднання параметрів, яке мінімізує суму капітальних і експлуатаційних витрат з урахуванням технічних обмежень на генерацію та споживання. Для розв'язання таких завдань використовуються методи лінійного або нелінійного програмування, а також багатокритеріальна оптимізація, яка враховує екологічні та показники надійності.

Сучасні підходи до управління ґрунтуються на адаптивних алгоритмах, які, отримуючи дані з IoT-сенсорів та прогнозів погоди, в реальному часі регулюють співвідношення між різними джерелами енергії та накопичувачами. Це дає можливість оперативно переключатися з фотоелектрики на біогаз у похмурі дні, оптимізувати роботу теплових насосів з урахуванням змінних температурних умов та найбільш ефективно використовувати ресурси акумулювання.

Загалом, представлені теоретичні моделі та підходи формують методологічну основу для подальшого практичного проектування та енергетичного аналізу системи автономного енергозабезпечення теплиці НДГ «Ворзель».

1.3 Методологія дослідження: інструменти енергетичного моделювання, економіко-математичні та системні підходи

Методика цього дослідження ґрунтується на комплексному підході, який поєднує збирання та обробку експериментальних даних, моделювання енергетичної поведінки, економіко-математичний аналіз та системну оптимізацію. Спочатку здійснюється збір метеорологічної інформації (сонячної радіації, температури повітря, вологості, швидкості вітру) за минулі періоди з використанням даних Укргідрометцентру та актуальних баз агрометеорологічних досліджень. Одночасно відбувається аналіз статистики споживання енергії тепличними господарствами України з метою створення типових профілів навантаження, а також дослідження технічної документації

потенційних складових системи – сонячних панелей, теплових насосів, біогазових установок та акумуляторів.

На другому етапі розробляється динамічна модель теплиці площею 2500 м², що описує теплові та електричні баланси у спеціалізованих симуляторах. Для аналізу теплового режиму використовується середовище TRNSYS з налаштованими блоками теплопровідності огорожувальних конструкцій, сонячної радіації та теплових насосів, що дозволяє моделювати коливання температури в приміщенні протягом доби та року. Паралельно у середовищі EnergyPlus створюється деталізована BIM-модель теплиці з урахуванням вентиляційних систем, систем освітлення й зволоження, що дозволяє зіставляти результати двох підходів та підвищувати точність прогнозу енергоспоживання.

Для обґрунтування архітектури гібридної енергосистеми використовується пакет HOMER, який автоматизує перебір різних конфігурацій фотоелектричних модулів, теплових насосів, генераторів біогазу та систем зберігання енергії. За допомогою HOMER визначається оптимальне співвідношення компонентів згідно з критеріями мінімізації капітальних витрат та загальних витрат проекту протягом його життєвого циклу, з урахуванням добових та сезонних коливань виробництва й споживання енергії.

Економічна оцінка виконується шляхом розрахунку чистої приведеної вартості (NPV), внутрішньої норми прибутковості (IRR) та строку окупності інвестицій. Фінансові потоки формуються на основі прогнозних цін на електроенергію та тепло, операційних витрат та можливого доходу від продажу надлишкової енергії в мережу або постачання тепла суміжним об'єктам. Одночасно проводиться багатофакторний аналіз, в якому враховуються екологічні показники (зниження викидів CO₂) та соціальний ефект (створення робочих місць), що дозволяє оцінити проект у ширшому контексті сталого розвитку.

Системний підхід доповнюється аналізом надійності та резервуванням: визначаються ключові компоненти, для яких передбачається резервна потужність або додаткове живлення, а також розробляються адаптивні

алгоритми управління на основі IoT-сенсорів та прогнозів погоди. Ці алгоритми автоматично регулюють розподіл енергії між джерелами виробництва та накопичувачами, підтримуючи стабільний енергетичний баланс навіть за несприятливих погодних умов.

Завдяки такій послідовній методології – від збору даних і створення цифрової копії теплиці до фінансового моделювання та розробки систем управління – дослідження забезпечує комплексну основу для розробки та оптимізації автономної енергосистеми теплиці НДГ «Ворзель». Це дозволяє не тільки прогнозувати її функціонування в різних сценаріях, а й обґрунтовано вибирати технічні та економічні рішення для практичної реалізації.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено ґрунтовний аналіз наукових підходів, теоретичних понять та методологічних засад, необхідних для створення сучасної автономної енергетичної системи тепличного господарства. Основною метою розділу було закласти науково-теоретичний фундамент, на якому базується подальше проєктування системи енергопостачання на базі поновлюваних джерел енергії (ВДЕ) з урахуванням специфіки аграрного об'єкта — теплиці площею 2500 м².

Проведений огляд наукових публікацій засвідчив активне формування нових підходів до побудови гібридних енергетичних систем, які поєднують різноманітні технології генерації та зберігання енергії. Було виявлено, що найвищу ефективність демонструють синергетичні системи, у яких різні джерела — сонячна енергія, біогаз, теплові насоси — інтегруються у єдину керовану мережу з централізованим або розподіленим управлінням. Окрему увагу приділено концепціям адаптивного енергоменеджменту та ролі інтелектуальних систем на базі IoT, які дозволяють автоматизувати контроль і балансування між генерацією, споживанням та накопиченням енергії.

Розкрито теоретичні засади побудови математичних моделей: теплових балансів, моделі генерації фотоелектричних систем, зарядно-розрядних процесів в акумуляторах та економічної оптимізації системи з урахуванням обмежень. Зокрема, подано формалізовані рівняння теплових втрат теплиці, залежності генерації електроенергії від інсоляції та ефективності PV-модулів, а також функцію мінімізації сумарних витрат на життєвий цикл енергетичної системи. Ці моделі стали основою для подальшого комп'ютерного моделювання системи з використанням спеціалізованого ПЗ.

Методологічно дослідження опирається на системний підхід і передбачає використання сучасних інструментів моделювання (TRNSYS, HOMER, EnergyPlus), статистичних баз метеорологічних даних, технічної документації та економічних індикаторів ефективності (NPV, IRR, LCOE). Такий підхід забезпечує можливість комплексної оцінки функціонування майбутньої енергосистеми в умовах змін клімату, ринкових коливань та сезонної нерівномірності енергоспоживання.

Отже, результати першого розділу дозволили сформулювати чіткі науково-методичні орієнтири для практичного проектування автономної енергетичної системи, заклавши основи для подальших етапів моделювання, розрахунків і оцінки ефективності енергопостачання тепличного господарства НДГ «Ворзель».

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПРАКТИК ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛИЧНИХ ГОСПОДАРСТВ

2.1 Аналіз існуючих моделей енергопостачання в теплицях

У сучасних тепличних господарствах спостерігається помітний перехід від звичних енергетичних систем, що спираються на викопне паливо, до гібридних мереж, які поєднують відновлювані джерела енергії. Цей розділ пропонує детальний огляд доступних конфігурацій енергозабезпечення, методів їхньої оптимізації, а також важливих інструментів моделювання, що продемонстрували свою ефективність у різних кліматичних та економічних умовах.

Традиційні автономні системи для теплиць здебільшого залежать від природного газу або дизельних генераторів для опалення та електропостачання. Хоча ці рішення є простими у впровадженні та потужними, вони супроводжуються значними викидами CO₂, високими експлуатаційними витратами та залежністю від коливань світових цін на енергоносії.

Серед однотипних систем, що працюють без резервування, найбільше поширення здобули схеми, засновані на одному джерелі відновлюваної енергії (ВДЕ). Сонячні теплові колектори можуть задовольнити більшу частину потреб у теплі в сонячний період, але вимагають додаткових джерел у похмурі дні або взимку. Фотоелектричні модулі широко використовуються для живлення вентиляторів, систем освітлення та насосів, але їхня автономність можлива лише за наявності акумуляторів чи резервної генерації. Біогазові установки ефективно використовують органічні відходи, проте потребують складної логістики підготовки сировини та регулярного технічного обслуговування.

Гібридні моделі, що комбінують два або більше джерела енергії, користуються найбільшою популярністю. Дослідження показують, що поєднання PV-панелей, сонячних колекторів та біомаси дозволяє знизити

витрати на 15–20% порівняно з ізольованими системами, що працюють лише на PV чи біогазі. У таких конфігураціях PV-модулі забезпечують живлення електроспоживачів, колектори попередньо нагрівають теплоносії, а біогазова установка покриває пікові потреби в холодну пору року.

Для оптимального вибору компонентів гібридних систем активно застосовується програмне забезпечення HOMER Pro. Воно автоматизує створення та порівняння тисяч архітектур мікромереж, обираючи найефективнішу з мінімальними капітальними та експлуатаційними витратами з урахуванням сезонності виробництва та споживання.

У зарубіжних тепличних комплексах дедалі частіше впроваджуються інтелектуальні платформи енергоменеджменту. Вони інтегрують IoT-датчики та алгоритми машинного навчання для прогнозування сонячної інсоляції та потреб в енергії, а також регулюють роботу обладнання в режимі реального часу. Такий підхід дає змогу досягти додаткової економії до 10% завдяки адаптивному управлінню режимами роботи джерел та накопичувачів.

Динамічне моделювання енергетичних процесів у теплицях здійснюється в середовищах TRNSYS та EnergyPlus. Дослідження свідчать, що понад тридцять років за останнє десятиліття успішно застосовували TRNSYS для симуляції теплового балансу теплиць з урахуванням метеорологічних умов. EnergyPlus дозволяє деталізувати внутрішні будівельні компоненти та системи клімат-контролю, збільшуючи точність прогнозів енергоспоживання.

Окрім звичних методів оптимізації, в наукових дослідженнях дедалі ширше використовуються багатокритеріальні підходи (MCDM) та стохастичні моделі з Монте-Карло симуляцією для врахування невизначеності в інсоляції, температурах та цінах на енергоносії. Це забезпечує більш надійну оцінку ризиків та дає змогу знаходити компроміс між економічними, екологічними та експлуатаційними показниками.

Окремі приклади, зокрема дослідження динамічного моделювання теплиці з PV, сонячними колекторами та біомасовим котлом, демонструють зниження енерговитрат до 30% та покращення мікроклімату в теплиці.

Наприклад, у прикладі італійських дослідників використання теплових насосів та сонячних колекторів у поєднанні з біогазовою установкою забезпечило стабільний мікроклімат навіть в зимовий період.

Підсумовуючи, аналіз доступних моделей демонструє:

- Традиційні системи на викопному паливі втрачають актуальність через екологічні та економічні обмеження;
- Однотипні ВДЕ-системи мають обмежену автономність без резервування;
- Гібридні архітектури з інтелектуальними платформами та оптимізаційними алгоритмами забезпечують найкраще поєднання надійності, економічності та екологічності;
- Використання спеціалізованих програмних середовищ для динамічного моделювання та економічного аналізу є необхідною умовою для успішного проектування автономних систем енергопостачання теплиць.

2.2 Класифікація й характеристика поновлюваних джерел енергії

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) – природні ресурси, що постійно оновлюються завдяки природним процесам, не вичерпуються при сталому використанні. Це стратегічний вибір на заміну викопному паливу, що сприяє зменшенню залежності від зовнішніх постачальників, скороченню викидів парникових газів та забезпеченню стійкішого та автономного функціонування господарств, наприклад, тепличних. Основними типами ВДЕ, які активно застосовуються в енергозабезпеченні тепличних комплексів, є сонячна, вітрова, біоенергетична, геотермальна енергія та енергія доквілля (теплові насоси).

Сонячна енергія

Сонячна енергія – один з найдоступніших та найпоширеніших типів ВДЕ у світі. Вона використовується у двох основних формах: як електроенергія, вироблена фотоелектричними системами (PV), та у вигляді тепла – за допомогою сонячних теплових колекторів.

Фотоелектричні панелі монтують на дахах теплиць, наземних конструкціях або поряд з об'єктами. Вони перетворюють сонячне випромінювання в електроенергію, що використовується для освітлення, поливу, вентиляції та автоматичного регулювання мікроклімату. Сучасні PV-модулі мають коефіцієнт корисної дії (ККД) від 15% до 22%, ефективність залежить від регіону, орієнтації, температури та чистоти поверхні.

Сонячні колектори (плоскі або вакуумні) використовуються для нагрівання води або теплоносія, який далі надходить до систем опалення теплиці або для забезпечення побутових потреб. У поєднанні з теплоаккумуляторами вони дозволяють зберігати надлишок тепла вночі чи у похмуру погоду, підтримуючи стабільний температурний режим для рослин.

Переваги сонячної енергії: екологічна чистота, доступність, низькі операційні витрати та легкість інтеграції в існуючу інфраструктуру. Недоліки: залежність від сонячної активності, потреба накопичення енергії та відносно висока вартість початкового обладнання.

Сонячна енергія особливо актуальна для південних регіонів України, де тривалість сонячного сяйва перевищує 2000 годин на рік. При правильній системній інтеграції PV-елементів та колекторів можна повністю забезпечити енергетичну незалежність тепличного господарства на площі 1–3 гектари.

Вітрова енергія

Вітрова енергія – одна з основних технологій виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, особливо ефективна в регіонах з постійними вітрами. Її отримують шляхом перетворення кінетичної енергії повітряних мас у механічну, а потім – в електричну за допомогою вітротурбін.

У тепличному господарстві вітрову енергію доцільно використовувати як додаткове або резервне джерело електроенергії, особливо у віддалених районах, де обмежений доступ до централізованих мереж. Вітрові електроустановки (ВЕУ) невеликої та середньої потужності (від 1 до 50 кВт) можуть живити системи освітлення, циркуляції повітря, водяного підігріву, а також заряджати акумулятори в гібридних схемах з сонячними панелями.

Основні переваги:

- Високий ККД при стабільній швидкості вітру (до 40%);
- Незалежність від сонячного світла;
- Можливість роботи вночі та взимку;
- Порівняно низькі експлуатаційні витрати після встановлення.

Серед недоліків: нестабільність виробництва залежно від швидкості вітру, шумовий ефект, необхідність відкритих просторів без перешкод (дерев, будівель), потенційна небезпека для птахів. Крім того, вітрові установки вимагають регулярного технічного обслуговування, включаючи перевірку лопатей, генератора та системи стабілізації.

На території України найбільш підходящими для вітрової генерації є південні області – Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька та райони Приазов'я. Середня швидкість вітру там досягає 6–8 м/с, що дозволяє ефективно використовувати ВЕУ середньої потужності.

Оптимальним є застосування вітрової енергетики як частини комбінованих систем, разом з сонячними панелями та акумуляторними батареями, що забезпечує цілодобове живлення теплиці в різних погодних умовах та зменшує залежність від одного джерела енергії.

Біоенергетика

Біоенергетика охоплює виробництво теплової та електричної енергії з органічних матеріалів, таких як рослинні залишки, гній, харчові та аграрні відходи, деревина, біогаз та біоетанол. У контексті тепличного господарства найчастіше використовуються біогазові установки та твердопаливні котли на біомасі.

Біогазові установки здійснюють анаеробне зброджування органічної сировини, в результаті чого утворюється метан, що спалюється в когенераційних установках для отримання тепла та електроенергії. Тепло використовується для обігріву теплиць, електроенергія – для живлення освітлення, насосів, вентиляторів. Додатковим плюсом є виробництво біодобрив як побічного продукту.

Котли на біомасі спалюють пелети, деревну щепу, соломку та іншу суху масу, виділяючи тепло для підтримки температури в теплицях. Вони можуть бути автоматизовані, мають високий ККД (до 85–90%) та потребують мінімального втручання персоналу.

Переваги біоенергетики:

Можливість переробки місцевих аграрних відходів;

- Цілорічна доступність ресурсу;
- Незалежність від погодних умов;
- Замкнутий енергетично-аграрний цикл (власна енергія та добрива).

Недоліки:

- Необхідність складної інфраструктури (ферментатори, котельні, склади палива);
- Первинні інвестиції та потреба в постійному постачанні сировини;
- Складність масштабування для малих господарств.

В Україні біоенергетика має значний потенціал, особливо в центральних та північних регіонах, де багато тваринницьких комплексів та агропідприємств, здатних генерувати сировину. Її інтеграція в тепличне виробництво дозволяє створити практично автономні енергетичні цикли з нульовими викидами CO₂.

Геотермальна енергія

Геотермальна енергія – це тепло земної кори, яке може використовуватися для обігріву приміщень, зокрема теплиць, без використання викопного палива. Джерелом енергії є гарячі підземні води, парові джерела або глибокі геотермальні зони. У контексті тепличного господарства використовують два основних способи її використання: пряме використання гарячої води або геотермальні теплові насоси.

Пряме геотермальне опалення передбачає подачу гарячої води з підземних джерел до систем труб, розташованих під або вздовж теплиць. Це забезпечує ефективне опалення без потреби додаткового виробництва тепла. Цей метод широко застосовується в країнах з вулканічною активністю –

Ісландії, Італії, Туреччині – але має перспективи й для України в регіонах з термальними водами (Закарпаття, Одещина, Херсонщина).

Геотермальні теплові насоси використовують принцип перекачування тепла із землі в систему обігріву теплиці. Вони працюють навіть при помірній температурі ґрунту (8–14 °С) і дозволяють підтримувати стабільну температуру повітря взимку та охолодження влітку. Системи типу «ґрунт-вода» або «вода-вода» потребують буріння свердловин і встановлення теплообмінників, але характеризуються високою ефективністю (ККД до 400%).

Переваги геотермальної енергії:

- Висока надійність і безперебійність роботи незалежно від погоди;
- Низькі операційні витрати;
- Екологічність та відсутність викидів при експлуатації;
- Можливість цілорічного використання.

Серед недоліків: великі капітальні витрати на буріння, потреба в геологічному обґрунтуванні, а також обмежена кількість регіонів, де можливе пряме використання термальних джерел.

В українських умовах геотермальне опалення може бути актуальним для великих тепличних комплексів, готових інвестувати в довгострокові проекти з низькою вартістю тепла в майбутньому. Геотермальні теплові насоси мають ширше застосування – вони можуть функціонувати на більшості території країни без прив'язки до джерел гарячих вод.

Теплові насоси

Теплові насоси – це пристрої, які дозволяють переносити теплову енергію з одного середовища (наприклад, ґрунту, повітря чи води) до іншого. Вони працюють за принципом зворотного холодильника: замість охолодження – здійснюють нагрівання. У тепличному господарстві теплові насоси використовуються для підтримки постійної температури повітря або нагрівання води для систем опалення та поливу.

Найбільш поширені типи для сільськогосподарського використання:

- Повітря-повітря – використовують зовнішнє повітря як джерело тепла;

- Повітря-вода – перетворюють тепло з повітря на нагрівання води;
- Ґрунт-вода – вилучають енергію з геотермальних шарів землі;
- Вода-вода – використовують тепло з підземних або відкритих водойм.

Переваги:

- Енергоефективність (ККД у 3–4 рази вищий за електричне опалення);
- Універсальність (працюють і на обігрів, і на охолодження);
- Безпека та екологічність (немає відкритого полум'я, шкідливих викидів);
- Відсутність залежності від викопного палива.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання та монтажу;
- Зниження ефективності при сильних морозах (особливо для повітряних систем);
- Потреба у зовнішніх джерелах енергії для живлення компресора.

Для теплиць теплові насоси – ідеальне рішення при наявності дешевої електроенергії (наприклад, з ВДЕ). У комбінації з сонячними панелями або вітротурбінами вони забезпечують стабільне й автономне енергозабезпечення. У перехідні періоди насоси можуть працювати в режимі охолодження, що важливо для запобігання перегріву рослин.

В умовах України теплові насоси є перспективним напрямком енергомодернізації малих та середніх тепличних господарств, особливо в західних та центральних регіонах з м'якшим кліматом. Їх гнучкість дозволяє інтегрувати насоси в нові або існуючі системи, підвищуючи ефективність виробництва без значного збільшення операційних витрат.

Таблиця 2.1

Порівняльні характеристики різних типів ВДЕ

Джерело енергії	Основні форми використання	Переваги	Недоліки	Доцільність застосування в Україні
Сонячна енергія	Фотоелектричні панелі, сонячні колектори	Екологічність, низькі експлуатаційні витрати, модульність	Залежність від сонця, потреба в акумуляції, висока ціна	Південні регіони (інсоляція > 2000 год/рік)

Вітрова енергія	Вітрові електроустановки (ВЕУ)	Незалежність від сонця, нічна генерація, висока ефективність	Шум, залежність від вітру, потреба в відкритому просторі	Південь та узбережжя (6–8 м/с вітру)
-----------------	--------------------------------	--	--	--------------------------------------

Продовження таблиці 2.1

Біоенергетика	Біогазові установки, котли на біомасі	Переробка відходів, автономність, утворення добрив	Високі інвестиції, потреба в сировині, складність інфраструктури	Центр і північ (наявність аграрних і тваринницьких відходів)
Геотермальна енергія	Гаряча вода, геотермальні теплові насоси	Незалежність від погоди, сталість температури, низькі витрати	Висока ціна буріння, геологічні обмеження	Закарпаття, Одещина, Херсонщина
Теплові насоси	Повітря-повітря, повітря-вода, ґрунт-вода, вода-вода	Висока ефективність, універсальність, екологічність	Зниження ефективності при морозах, висока ціна встановлення	Центральні й західні регіони з м'яким кліматом

2.3 Міжнародний досвід впровадження ВДЕ в тепличних системах

У світлі наростаючої потреби світу в продовольстві, змін клімату та зростання цін на викопне паливо, країни все активніше впроваджують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) в сільськогосподарський сектор, зокрема в теплиці. Цей підхід дозволяє знизити витрати на енергозабезпечення, покращити екологічність та самостійність тепличних господарств, особливо в регіонах з екстремальними погодними умовами чи обмеженим доступом до енергоносіїв. В даному розділі представлено досвід впровадження ВДЕ в тепличні системи в таких країнах, як Нідерланди, Ісландія, Австралія, Японія, Канада, Ізраїль, США та інших.

Аналіз міжнародного досвіду важливий не лише для порівняння рівня технологічного розвитку, але й для виявлення ключових відмінностей у підходах до організації енергопостачання, регулювання мікроклімату, утилізації тепла, водопостачання та автоматизації тепличних процесів. Саме комплексний облік кліматичних, економічних та інфраструктурних факторів дозволяє успішно адаптувати закордонні практики в умовах українського сільського господарства.

Нідерланди: Комплексний підхід до сталого тепличного виробництва

Нідерланди – визнаний лідер в сфері тепличного виробництва, попри їх невеликий розмір та помірно-континентальний клімат. Країна посідає друге місце в світі за обсягом експорту сільськогосподарської продукції, значною мірою завдяки високотехнологічним тепличним комплексам, які активно інтегрують відновлювані джерела енергії.

Одним з основних напрямків стало впровадження когенераційних систем (CHP – combined heat and power), які забезпечують одночасне виробництво тепла, електроенергії та CO₂. Вуглекислий газ, що є побічним продуктом горіння, не викидається в атмосферу, а подається в теплиці для стимулювання фотосинтезу. Таким чином, енергетичні втрати зменшуються, а продуктивність зростає.

Теплиці нового покоління у Вестланді оснащені сонячними колекторами, тепловими насосами та буферними ємностями для накопичення тепла. Вночі або в похмуру погоду використовуються акумульовані ресурси, а надлишок електроенергії надходить в загальну мережу.

Важливу роль в стимулюванні таких змін відіграє державна програма "Kas als Energiebron" («Теплиця як джерело енергії»), яка передбачає дотації на встановлення обладнання для ВДЕ, підтримку наукових досліджень та впровадження інновацій. Фінансова участь фермерських кооперативів, спільне управління ресурсами та використання "розумного" програмного забезпечення для регулювання клімату роблять ці теплиці прикладом стійкої, адаптивної та рентабельної сільськогосподарської системи.

В майбутньому Нідерланди планують повністю відмовитися від використання природного газу в агросекторі до 2040 року, що робить їх не тільки технологічними піонерами, а й взірцем державної екологічної відповідальності.

Ісландія: Геотермальний прорив у північному кліматі

Ісландія – приклад країни, яка повністю інтегувала відновлювальну енергетику в усі сфери життя, в тому числі і в сільське господарство. Умови для

цього надзвичайно сприятливі: країна розташована в зоні активної вулканічної діяльності, що дозволяє отримувати доступ до гарячих джерел практично по всій території. Це зробило геотермальну енергію основним джерелом теплопостачання, в тому числі для тепличного господарства.

Теплиці в Ісландії, зокрема в районах Хверагерді, Рейк'явіка, Сельфосса, використовують гарячу воду температурою 80–100°C, яка транспортується до теплиць спеціальними ізольованими трубопроводами. Вода використовується для обігріву повітря, ґрунту, води для зрошення, а також в системах рекуперації. Таким чином, майже всі потреби в енергії забезпечуються без застосування викопного палива.

У поєднанні з гідроелектроенергією (друга за обсягами генерації в Ісландії), ісландські теплиці використовують світлодіодне освітлення, вентиляційні системи, електроприводи й автоматизоване управління на основі повністю відновлюваних джерел. При цьому вартість енергії для сільгоспвиробників є однією з найнижчих в Європі.

Ці фактори дозволили Ісландії забезпечити себе вітчизняними овочами, зокрема томатами та огірками, незважаючи на короткий світловий день взимку та низькі температури. Крім того, екологічність продукції стала конкурентною перевагою на зовнішніх ринках. Досвід Ісландії демонструє, що навіть в найсуворіших кліматичних умовах можна досягти повної енергетичної незалежності тепличного виробництва.

Австралія: Сонячна енергія як фундамент аграрної самодостатності

Австралія – країна з надзвичайно посушливим кліматом, особливо в північних та центральних регіонах, де річна кількість опадів часто не перевищує 250 мм. Водночас регіони мають високий рівень сонячної інсоляції, що створює унікальні умови для впровадження сонячної енергетики в агросекторі.

Найбільш показовим проектом в цій сфері є комплекс Sundrop Farms в Порт-Огасті (Південна Австралія), який займає понад 20 гектарів теплиць.

Проект базується на трьох ключових принципах: використання морської води, сонячної енергії та повної енергетичної незалежності.

Основу енергосистеми комплексу складають концентруючі сонячні колектори, які забезпечують виробництво електроенергії для освітлення, опалення, автоматизованих систем поливу та управління мікрокліматом. Інша частина енергії використовується для опріснення морської води методом багатоступеневої флеш-дистиляції. Отримана прісна вода використовується для зрошення культур, а надлишок накопичується в спеціальних резервуарах.

Завдяки високій ефективності технологій, комплекс щорічно виробляє понад 17 тисяч тонн овочів — переважно томатів — без підключення до зовнішніх джерел водопостачання чи електромережі. Sundrop Farms також є прикладом сталого бізнесу, що продемонстрував життєздатність «закритої» моделі в аграрному виробництві, де джерела енергії та обіг ресурсів максимально автономізовані.

Австралійський досвід особливо корисний для посушливих південних регіонів України, які мають значний сонячний потенціал, але стикаються з дефіцитом води. Він демонструє, що інвестиції в ВДЕ можуть не тільки вирішити проблеми енерго- та водопостачання, але й зробити агробізнес повністю незалежним від зовнішніх ризиків.

Японія: Агровольтаїка та автоматизація тепличного виробництва

Японія – одна з найбільш технологічно розвинених країн світу, яка активно впроваджує інновації в сільське господарство. В умовах обмежених природних ресурсів, нестачі сільськогосподарських земель та високої вартості енергії японські фермери змушені постійно шукати нові способи оптимізації виробництва. Одним з таких рішень стало широке застосування агровольтаїки – поєднання фотоелектричних систем з тепличною або відкритою вирощуванням культур.

В префектурах Яманасі, Сайтама, Окінава, Кіото було реалізовано понад 200 пілотних проектів, де сонячні панелі розміщуються на спеціальних металевих конструкціях над теплицями, забезпечуючи генерацію

електроенергії, захист рослин від перегріву та зменшення випаровування вологи. Частина енергії використовується на освітлення, вентиляцію, полив, автоматизоване відкриття вікон та штор, інша – реалізується в загальну мережу згідно з державною програмою Feed-in Tariff (FiT).

Особлива увага приділяється інтелектуальним системам управління: японські теплиці оснащуються комплексами штучного інтелекту, які аналізують погодні умови, рівень освітлення, вологість, температуру ґрунту та повітря, здійснюючи корекцію параметрів в реальному часі. Деякі господарства використовують мобільні додатки та хмарні сервіси для дистанційного управління теплицею.

Досвід Японії демонструє, як можна інтегрувати ВДЕ в складні, багатофункціональні системи тепличного виробництва навіть за умов високої щільності населення та дефіциту природних ресурсів. Це особливо актуально для регіонів України з обмеженим доступом до електромереж або підвищеним ризиком енергетичних коливань.

Канада: Біоенергетика та сезонна гнучкість в холодному кліматі

Канада, як країна з тривалим холодним періодом та значними витратами на опалення, має великий досвід у впровадженні ВДЕ, зокрема біоенергетичних технологій в тепличному секторі. В центральних та північних провінціях, таких як Онтаріо, Квебек та Британська Колумбія, активно використовуються котли на біомасі (деревна щепка, пелети, солома), а також біогазові установки, що працюють на органічних відходах ферм.

Типовим прикладом є теплиці компанії "Truly Green Farms" в Онтаріо, які обігріваються теплом від сусіднього біогазового комплексу, що переробляє залишки кукурудзи, гною та харчових відходів. Система когенерації дозволяє виробляти одночасно тепло, електроенергію та CO₂, який подається в теплиці для прискорення фотосинтезу.

Окремої уваги заслуговує досвід Університету Британської Колумбії, де тепличний експериментальний центр живиться від централізованої мережі на

біомасі з тепловим буфером, що дозволяє адаптувати роботу системи до сезонних потреб та мінімізувати енергетичні втрати.

В Канаді також активно розвиваються системи збору дощової води, сонячного підігріву та застосування теплових насосів. Комплексне поєднання цих технологій дозволяє забезпечити високу гнучкість, енергетичну незалежність та екологічність навіть в несприятливих кліматичних умовах. Цей досвід особливо цінний для впровадження в північних та гірських регіонах України, де збереження тепла та оптимізація витрат є критичними факторами успішного тепличного господарювання.

Ізраїль: енергоефективність в умовах засухи

Ізраїль, країна з обмеженими водними та енергетичними ресурсами, вже довгий час показує, як інновації в сільському господарстві можуть пом'якшити природні труднощі. Тут активно розвивається використання сонячної енергії у поєднанні з системами точного зрошення – крапельним поливом, що був розроблений саме в Ізраїлі та став світовим стандартом раціонального водокористування.

Теплиці в районах Негев, Галілея та Бекаа оснащені сонячними панелями на дахах, які забезпечують енергією системи освітлення, вентиляції та автоматизованого контролю клімату. Використовуються також гібридні рішення, комбінуючи сонячні батареї з біомасою, особливо в господарствах, де є доступ до сільськогосподарських відходів.

Інноваційною є практика встановлення плавучих сонячних установок на водоймах для зрошення: це не тільки дає змогу виробляти електроенергію, але й зменшує випаровування води до 30%, що критично важливо в посушливих умовах. Такі технології підтримуються державою через програму "Israel NewTech", яка фінансує екологічні стартапи та агротехнології.

Ізраїль також активно експортує свої технології в країни зі схожим кліматом – зокрема в Йорданію, Єгипет та Кіпр. Цей досвід демонструє, як навіть у складних умовах нестачі ресурсів можливо створити життєздатну, автономну, високотехнологічну тепличну систему. Для південних регіонів

України, які стикаються зі схожими викликами, цей підхід може бути дороговказом для розвитку.

США: енергонезалежні теплиці та міська агроенергетика

У Сполучених Штатах Америки тепличне виробництво все більше орієнтується на використання відновлюваних джерел енергії. Основними напрямками є впровадження сонячної енергетики, біогазових установок, геотермальних систем, а також розвиток вертикальних теплиць у межах міст.

У штаті Каліфорнія функціонують великі аграрні комплекси, які встановили PV-панелі загальною потужністю понад 1 МВт для забезпечення потреб теплиць. Системи зберігання енергії дозволяють забезпечувати безперебійну роботу в нічний час. Часто використовується інтеграція з біогазовими станціями, які переробляють органічні відходи з сільськогосподарського виробництва на електроенергію та тепло.

У Нью-Йорку реалізується низка урбаністичних проєктів, серед яких «Gotham Greens» – мережа теплиць, розташованих на дахах будівель. Ці теплиці використовують сонячні панелі, LED-освітлення та системи контролю клімату, цілком інтегровані в міську інфраструктуру. Такий підхід дозволяє вирощувати продукцію поруч із кінцевим споживачем, зменшуючи логістичні витрати та викиди CO₂.

У штатах Колорадо та Арізона активно впроваджуються геотермальні системи для опалення теплиць. Геотермальні насоси дозволяють підтримувати стабільну температуру в зимовий період навіть у гірських районах. У поєднанні з сонячними колекторами та резервними акумуляторами такі рішення забезпечують повну автономність фермерських господарств.

Університети США, як-от UC Davis або Cornell, проводять наукові дослідження з оптимізації тепличного енергозабезпечення. Вони розробляють симуляційні моделі, вивчають поведінку рослин за різних умов освітлення й температури, створюють алгоритми штучного інтелекту для управління теплицями. Це свідчить про глибоку інтеграцію науки, освіти та практичного сільськогосподарського виробництва.

США демонструють приклад масштабного підходу до енергетичної модернізації аграрного сектору, що охоплює як великі агрохолдинги, так і малі фермерські господарства та міські ініціативи. Такий досвід варто вивчати для формування децентралізованої моделі енергозабезпечення тепличного господарства в Україні.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було здійснено комплексний аналіз сучасних моделей енергозабезпечення тепличних господарств, що базуються як на традиційних джерелах енергії, так і на поновлюваних. Встановлено, що в умовах зростання вартості енергоресурсів і загострення кліматичних викликів, дедалі актуальнішим стає перехід до гібридних енергосистем, у яких поєднуються різні види ВДЕ.

Було класифіковано основні види поновлюваної енергії — сонячну, вітрову, біоенергетику, геотермальну енергію та теплові насоси — з оцінкою їх ефективності, екологічності, вартості впровадження й доцільності використання в аграрному секторі України. Проаналізовано їх сильні та слабкі сторони, регіональні особливості впровадження, а також типові способи інтеграції в тепличні господарства. Встановлено, що найбільш перспективним підходом є застосування сонячної енергії (PV та сонячні колектори) у поєднанні з тепловими насосами та біогазовими установками.

Окрему увагу приділено міжнародному досвіду, що включає приклади з Нідерландів, Ісландії, Австралії, Японії, Канади, Ізраїлю та США. Розглянуто не лише технологічні, але й організаційні та економічні моделі впровадження ВДЕ: агровольтаїка в Японії, геотермальне опалення в Ісландії, автономні тепличні комплекси в Австралії, біоенергетика в Канаді. Узагальнення зарубіжного

досвіду дозволило виділити кілька стратегій, які можуть бути адаптовані в українських реаліях, зокрема в проєкті енергозабезпечення теплиці НДГ «Ворзель».

Проведений аналіз засвідчив, що найкращі результати досягаються за умов використання гнучких енергетичних систем, що здатні адаптуватися до кліматичних змін, сезонної доступності ресурсів та економічних ризиків. Таким чином, другий розділ слугує практичним підґрунтям для розробки оптимальної конфігурації автономного енергопостачання теплиці, адаптованої до умов Київської області.

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ПДЕ ДЛЯ ТЕПЛИЦІ НА 2500 М²

3.1. Кліматичні умови регіону й оцінка енергетичних потреб теплиці

Для ефективного проектування енергетичної системи теплиці, яку планується розмістити на території навчально-дослідного господарства "Ворзель" НУБіП України, є критично необхідним ретельний аналіз кліматичних характеристик місцевості, а також детальне дослідження майбутнього споживання енергії об'єктом. Це дозволить грамотно підійти до вибору систем обігріву, вентиляції, освітлення та автоматизованого контролю клімату, враховуючи реальні потреби та сезонні зміни.

Обґрунтування вибору типу теплиці

Вибір блокової аркової теплиці готичного типу базується на декількох факторах, зокрема, економічній вигідності, високій енергоефективності, технологічній гнучкості та адаптивності до кліматичних умов Київської області. Цей тип конструкції є одним із найпоширеніших в регіоні завдяки відносно невисокій вартості будівництва, легкості обслуговування та універсальності для вирощування широкого спектру сільськогосподарських культур.

Готична аркова форма вирізняється підвищеною стійкістю до снігового навантаження, що досягається завдяки стрілчастій геометрії даху, яка сприяє ефективному стіканню опадів і зменшує ризик деформації каркасу. Такий дах дозволяє уникнути накопичення снігу в зимовий період, що особливо актуально для регіону з мінливою сніговою активністю. Крім того, значна висота у коньку (до 4,5 м) створює достатній об'єм повітря, що забезпечує стабільний мікроклімат і дає можливість без проблем інтегрувати системи вентиляції, туманоутворення чи кондиціонування.

Додатковою перевагою є використання подвійного плівкового покриття з повітряним прошарком, що дозволяє скоротити тепловтрати до 30% у

порівнянні з одинарною плівкою. Повітряна ізоляція формує природний бар'єр для холоду взимку та перегріву влітку, зменшуючи навантаження на систему обігріву чи охолодження. Модульна конструкція такої теплиці площею 2500 м² дозволяє масштабувати об'єкт, адаптувати його під різні агротехнічні режими та забезпечити ефективне використання внутрішнього простору.

Відтак, обрана конструкція є оптимальним компромісом між інвестиційними витратами, ефективністю теплоізоляції та технологічною зручністю експлуатації в умовах помірно-континентального клімату центральної України.

Потреби в енергії розподіляються на два ключові категорії:

- теплова енергія – для обігріву приміщення в холодну пору року;
- електрична енергія – для освітлення, автоматики, циркуляції повітря, поливу тощо.

Кліматична характеристика регіону (сmt Ворзель, Київська область)

Селище міського типу Ворзель розташоване в північній частині Київської області, в межах Бучанського району, приблизно за 25 км на захід від Києва. Регіон характеризується помірно-континентальним кліматом, який вирізняється вираженою сезонністю, помірною вологістю, м'якою зимою та тривалим теплим літом.

Кліматичні умови визначають роботу тепличного господарства, оскільки вони впливають на потребу в опаленні, вентиляції, освітленні та зволоженні. Середньорічна температура повітря у Ворзелі складає +7,8...+8,1 °С. Холодна пора року триває з листопада по березень. Середня температура січня складає –5,5 °С, хоча в нічний час може знижуватися до –20 °С. Влітку середні температури коливаються від +18 до +22 °С, з максимальними піками до +35 °С у липні.

Річна кількість опадів у регіоні становить від 550 до 650 мм, з переважною їх кількістю у весняно-літній період. Сніговий покрив зазвичай нестійкий, тримається не більше 30–40 днів на рік, але при різких похолоданнях можливе утворення ожеледиці або накопичення снігу на дахах теплиць, що збільшує навантаження на конструкції.

Сонячна активність у регіоні є достатньою для використання фотоелектричних систем: сумарна річна тривалість сонячного сяйва становить 1800–2000 годин. Найбільш інтенсивна інсоляція спостерігається з квітня по вересень. Це відкриває потенціал для широкого застосування сонячної енергетики у весняно-літній сезон.

Середня швидкість вітру у Ворзелі — 3–5 м/с, з переважанням західного та північно-західного напрямків. Хоча ці показники не дозволяють використовувати великі вітротурбіни, вони можуть бути в майбутньому застосовані для малопотужних установок у складі комбінованої системи ВДЕ.

Для регіону також характерні часті зміни атмосферного тиску, тумани у міжсезоння та підвищена вологість у другій половині літа, що вимагає встановлення надійних систем вентиляції та осушення повітря в теплиці.

Таким чином, кліматичні параметри Ворзеля сприятливі для тепличного виробництва за умови застосування адаптивної енергетичної інфраструктури. Вони формують чіткі вимоги до енергосистем: високі теплові потужності взимку, наявність електричного резерву вночі, ефективне використання сонячного потенціалу влітку та підтримання клімат-контролю в умовах коливань вологості.

Таблиця 3.1

Кліматичні характеристики смт Ворзель, Київська область

Параметр	Значення / Опис
Кліматичний тип	Помірно-континентальний
Середньорічна температура	+7,8...+8,1 °С
Середня температура січня	–5,5 °С (у нічний час до –20 °С)
Середня температура липня	+18...+22 °С (максимальні піки до +35 °С)
Холодний період	Листопад – березень
Річна кількість опадів	550–650 мм
Період найбільшої кількості опадів	Весна – літо

Продовження табл. 3.1

Сніговий покрив	Нестійкий, тримається 30–40 днів; можливе обледеніння і накопичення снігу
Сонячна активність	1800–2000 годин на рік
Період активної інсоляції	Квітень – вересень
Середня швидкість вітру	3–5 м/с
Переважні напрямки вітру	Західний та північно-західний
Потенціал використання ВДЕ	Високий для сонячної енергетики; можливість застосування малопотужних вітроустановок

Оцінка теплових потреб теплиці

Для коректного розрахунку теплового навантаження необхідно враховувати кліматичні параметри регіону, конструктивні особливості теплиці та тип використаного огороження. В умовах Ворзеля середня температура повітря в січні коливається в межах $-6\dots-8$ °С. Оптимальна температура повітря в теплиці для вирощування овочевих культур у зимовий період становить близько $+18$ °С. Відтак, розрахунковий температурний перепад складає $24-26$ °С.

Для плівкової конструкції з подвійним покриттям та повітряним прошарком коефіцієнт теплопередачі (U) зазвичай становить близько $3,8$ Вт/м²·К.

Щоб визначити загальні тепловтрати, необхідно врахувати площу всіх огорожувальних конструкцій теплиці (стіни та дах). Незважаючи на те, що площа підлоги теплиці дорівнює 2500 м², площа огорожувальних конструкцій є більшою через висоту стін та криволінійну поверхню даху. Для теплиці аркового типу з висотою $4,5$ м співвідношення площі огорожувальних конструкцій до площі підлоги зазвичай складає $1,3-1,4$. У нашому випадку це: 2500 м² \times $1,4 \approx 3500$ м² — площа, через яку відбуваються тепловтрати.

Розрахунок теплових втрат проводиться за формулою:

$$Q = U \times A \times \Delta T \times t, \quad (3.1)$$

де:

- Q — загальна теплова енергія (Вт·год),
- U — коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·К,
- A — площа огорожувальних конструкцій, м²,
- ΔT — різниця температур, К,
- t — час обігріву, год.

Підставимо значення:

$$Q = 3,8 \times 3500 \times 26 \times 24 \approx 8\,300\,000 \text{ Вт}\cdot\text{год} = 8,3 \text{ МВт}\cdot\text{год/добу} \quad (3.2)$$

Однак, потрібно враховувати додаткові тепловтрати через інфільтрацію повітря, вентиляцію, неідеальні умови монтажу та нічні піки холоду. Тому, враховуючи поправочні коефіцієнти, фактичне добове теплове навантаження може досягати 10–12 МВт·год/добу.

Таким чином, рекомендована максимальна теплова потужність системи опалення повинна становити щонайменше 300–350 кВт, щоб забезпечити безперебійну підтримку мікроклімату навіть у найбільш несприятливі дні зими.

Електричне навантаження

Електричні потреби теплиці визначаються низкою факторів, включно з освітленням, системами автоматичного управління мікрокліматом, циркуляційним обладнанням, поливом, а також допоміжними механізмами. Нижче представлено деталізований аналіз основних складових електроспоживання.

Світлодіодне освітлення: Для підтримки фотосинтетичної активності рослин у зимовий період або за недостатньої природної освітленості

використовуються LED-світильники потужністю 5 Вт/м². Для теплиці площею 2500 м² сумарна потужність освітлення становить:

$$5 \text{ Вт} \times 2500 \text{ м}^2 = 12\,500 \text{ Вт} = 12,5 \text{ кВт} \quad (3.3)$$

За умови 12-годинного режиму роботи – денне споживання електроенергії тільки на освітлення становить:

$$12,5 \text{ кВт} \times 12 \text{ год} = 150 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу} \quad (3.4)$$

Циркуляційні вентилятори та автоматика: Ці системи забезпечують обмін повітря, запобігають утворенню конденсату, рівномірно розподіляють тепло та вологу. Потужність залежить від кількості встановлених вентиляторів, термостатів, контролерів та датчиків. Сумарна потужність становить:

3–5 кВт при безперервній або циклічній роботі (6–18 год/добу)

Насосне обладнання: Включає системи крапельного поливу, подачі живильного розчину, циркуляції теплоносія (у випадку систем водяного обігріву або роботи з тепловим насосом). Орієнтовна потужність:

1–2 кВт, із середнім навантаженням 2–6 год/добу.

Системи управління, моніторингу та безпеки: Включають електроживлення для диспетчеризації, аварійного освітлення, датчиків CO₂, рівня вологості, сигналізації. Споживання невелике — до 0,5 кВт.

Підсумовуючи:

Сумарна встановлена електрична потужність теплиці: 18–20 кВт;

Середньодобове електроспоживання: в залежності від сезону, активності обігріву/вентиляції та тривалості світлового дня – від 200 до 250 кВт·год/добу, з піками взимку при 12–14 годинах штучного освітлення.

Ці показники беруться до уваги при виборі відповідного джерела електроенергії та систем накопичення для автономного або гібридного енергозабезпечення об'єкта.

Оцінка цих потреб є вкрай важливою передумовою для подальшого вибору систем відновлюваної енергетики та проектування гібридної або автономної схеми енергозабезпечення.

3.2. Вибір поновлюваних джерел і характеристика обладнання

Зважаючи на детальний аналіз кліматичних, інфраструктурних та енергетичних умов, що визначають функціонування теплиці у смт Ворзель, що відноситься до Бучанського району Київської області, доцільно застосувати комбіновану систему, базуючись на поновлюваних джерелах енергії (ПДЕ). Ця система повинна забезпечувати обидва: теплові та електричні потреби тепличного комплексу площею 2500 м².

Ворзель характеризується помірно-континентальним кліматом з середньою вологістю, яскраво вираженими порами року, не надто суворими зимами та теплими літніми періодами. За багаторічними спостереженнями середньорічна температура коливається в межах +7,8...+8,1 °С. Зими визначаються середніми температурами біля -4...-6 °С, з періодичними зниженнями до -20 °С. Річна кількість опадів у регіоні становить 550–650 мм, з піками навесні та на початку літа. Інтенсивність сонячного випромінювання досягає 1800–2000 год/рік, що сприяє встановленню фотоелектричних систем.

Через сукупність факторів: помірний клімат, наявність вільних територій для розміщення обладнання, достатня сонячна інсоляція та доступ до органічної біомаси (гній, відходи рослинництва, скошена трава), Ворзельський кластер є вигідним місцем для реалізації багатоступінчастої автономної енергетичної системи теплиць на базі ПДЕ.

Для забезпечення енергетичної незалежності та зниження операційних витрат рекомендовано інтегрувати такі джерела та устаткування:

- Сонячна фотоелектрична станція (СФЕС);
- Сонячні теплові колектори;
- Біогазова когенераційна установка;

- Повітряний тепловий насос;
- Резервні джерела живлення та автоматика.

Сонячна фотоелектрична станція

Для покриття середньодобових електричних потреб (≈ 250 кВт·год/добу) вибрана система, що використовує монокристалічні сонячні панелі Tongwei TWMND-72HS585W, доступні для придбання на території України.

Основні технічні параметри:

- Потужність однієї панелі – 585 Вт;
- Кількість панелей – 100–110 шт;
- Загальна встановлена потужність – 58,5–64,3 кВт;
- Орієнтація – південна, кут нахилу 30° ;
- Очікуване річне виробництво електроенергії – 60–80 МВт·год;
- Строк служби – понад 25 років.

До системи додається гібридний інвертор Deye SUN-60K-SG02HP3-EU з ККД понад 98% та акумуляторна система на 60–80 кВт·год, що дозволить постачати електроенергію у нічний час або при аваріях для критично важливого обладнання (насоси, автоматика, освітлення).

Сонячні теплові колектори

Для попереднього підігріву води та часткового опалення теплиці у перехідний період застосовується система на основі вакуумних колекторів Altek SP-CL-30, які мають високу ефективність та ефективно працюють за низьких температур.

Основні технічні характеристики

- Тип – вакуумний колектор з мідним теплообмінником;
- Кількість трубок – 30 шт;
- Площа абсорбера одного модуля – $2,42$ м²;
- Кількість модулів – 15–20 шт (загальна площа ≈ 35 – 45 м²);
- Система акумуляції тепла – буферна ємність на 3–5 м³;
- ККД – до 75% у ясну погоду;

- Термін експлуатації – до 20 років.

Колектори функціонують у парі з насосною станцією та терморегулятором, що забезпечує подачу теплоносія у ґрунт або систему низькотемпературного опалення.

Біогазова установка

Основу для цілорічного забезпечення теплом та додаткового виробництва електроенергії складає установка БГУ-40 м³ українського виробництва, яку можна інтегрувати в агропідприємство, що має доступ до органічних відходів (гній, солома, залишки овочів тощо).

Технічні параметри:

- Об'єм реактора – 40 м³;
- Добове завантаження сировини – 2–3 т;
- Вихід біогазу – до 100 м³/добу;
- Електрогенератор – 30–50 кВт (на основі двигуна внутрішнього згоряння);
- Теплова енергія – до 100 кВт;
- ККД загальний – до 85%;
- Біодобриво як побічний продукт.

Ця система може забезпечити повну енергетичну незалежність теплиці взимку, коли сонячна активність низька. Її інтеграція дає змогу створити замкнутий цикл: біовідходи → біогаз → тепло + електроенергія → добрива.

Повітряний тепловий насос

В якості гнучкого джерела тепла у перехідні сезони (весна/осінь) та як додатковий спосіб підтримки температури взимку пропонується встановити повітряний тепловий насос Raymer RAY-10DS2-EVI:

Основні характеристики:

- Тип – повітря-вода;
- Номінальна теплова потужність – 10 кВт (можлива каскадність);
- COP – до 3,5 при t зовн. = +7°C;
- Робочий діапазон температур – від –25 до +43°C;

- Призначення – підігрів води в баки-акумулятори та системи опалення.

Можливе створення каскадної системи з декількох насосів, що працюватимуть за потреби, зменшуючи споживання енергії та забезпечуючи адаптивну реакцію на зміни зовнішньої температури.

Резервне обладнання та автоматика

У систему також входить:

- Дизельний генератор потужністю 30–40 кВт для аварійного живлення;
- Буферна теплова ємність (теплоакумулятор) на 10–15 м³;
- Інтелектуальна система управління (автоматика, контролери, IoT-моніторинг);
- Датчики вологості, температури, освітленості, CO₂ для гнучкого регулювання режиму роботи джерел.

Обрані джерела енергії та конкретні моделі обладнання відповідають потребам об'єкта як за потужністю, так і за надійністю. Вони доступні до придбання на території України, мають сервісну підтримку та добре інтегруються між собою. Комбінована система забезпечує:

- Енергетичну незалежність та резервування;
- Оптимальне поєднання ПДЕ та накопичення енергії;
- Зменшення викидів парникових газів;
- Високу гнучкість і можливість масштабування у майбутньому.

3.3 Схема системи, режими роботи та інтеграція компонентів

Розробка продуктивної енергетичної системи для теплиці розміром 2500 м² в кліматичних умовах Київщини вимагає не просто вибору окремих енергоджерел, але й їх комплексного об'єднання в цілісну, змінну мережу. Така система повинна забезпечити безперебійне функціонування тепличного комплексу протягом всього року, враховувати сезонні зміни температури та сонячного випромінювання, мати гнучкість при перемиканні між енергоджерелами та функціонувати з урахуванням економічної доцільності.

Структура системи та взаємодії

Інтегрована система заснована на принципах багаторівневого та каскадного забезпечення енергією. Це передбачає, що різні енергоджерела застосовуються в залежності від обставин — поточного навантаження, наявності ресурсу (сонця, біомаси), пори року та часу доби. Ключові компоненти:

Сонячна фотоелектрична станція (СФЕС): забезпечує головне денне електропостачання теплиці. Розташовується на господарських будівлях або окремо на полі неподалік. Живить систему освітлення, автоматику, насосні станції, частково — теплові насоси.

Сонячні теплові колектори: працюють у весняно-літній період для нагріву води, яку пізніше можна використовувати в опалювальній системі або як технічну гарячу воду. Енергія накопичується у водяних баках (теплоаккумуляторах).

Біогазова когенераційна установка: гарантує стабільне виробництво теплової та електричної енергії вночі та у похмурі дні. Сировина – органічні відходи з господарства. Тепло подається в систему обігріву, електрика – для забезпечення нічного навантаження.

Повітряні теплові насоси: при температурі вище $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ працюють як економне джерело тепла. Високий COP (до 3,5) робить їх вигідними в міжсезоння.

Акумуляторна батарея: накопичує електроенергію від СФЕС вдень для використання вночі або у години пікового навантаження.

Теплоаккумулятор: зберігає теплову енергію, отриману від біогазової установки, теплового насоса чи колекторів, гарантує рівномірну подачу тепла.

АСУ ТП (автоматизована система управління): обробляє дані з датчиків температури, вологості, рівня CO_2 , стану акумуляторів, генераторів і автоматично змінює пріоритети споживання енергії.

Дизель-генератор: резервне джерело енергії на випадок повної відсутності надходжень з основних джерел.

Сезонна логіка функціонування системи

Зимовий період: Взимку теплиця відчуває найбільше навантаження через потребу в постійному обігріві при низьких зовнішніх температурах (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Основним джерелом тепла стає біогазова когенераційна установка, яка працює без зупинки та забезпечує як теплову, так і частково електричну енергію.

Сонячна енергія використовується обмежено: у денні години – для покриття потреб в освітленні та зарядки акумуляторів. Потужність теплових насосів в цей час використовується лише за сприятливих температур (вище $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), що обмежує їхній внесок у загальний тепловий баланс. Теплоакумулятори активно накопичують надлишкове тепло вдень для забезпечення нічного обігріву, а електричні акумулятори резервують енергію для функціонування автоматики, аварійного освітлення та контролюючої апаратури.

Весна/осінь: У міжсезоння спостерігається зниження теплових навантажень, що дозволяє зменшити залежність від біогазової установки. Головне теплопостачання здійснюється через теплові насоси, які демонструють високу ефективність при температурі зовнішнього повітря від $+5$ до $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сонячні теплові колектори у сонячні дні забезпечують до 50% потреб у теплі, особливо в другій половині дня. Електричні потреби, зазвичай, повністю покриваються сонячною фотоелектричною станцією. Біогазова установка в цей період переходить у підтримуючий або резервний режим роботи.

Літо: Влітку система переходить у режим мінімального енергоспоживання. Потреба в обігріві відсутня, що дозволяє зосередити роботу на підтримці вентиляції, поливу, автоматичного контролю клімату та освітлення у випадках нестачі природного світла (наприклад, у похмурі дні). Фотоелектричні панелі здатні повністю забезпечити теплицю електроенергією, а надлишки – направляються в акумулятор або мережу. Сонячні колектори працюють на гаряче водопостачання, що використовується для господарських потреб або для миття ємностей, інвентарю тощо.

Пріоритети включення джерел

Функціонування комбінованої системи ВДЕ базується на логіці пріоритетного застосування найбільш продуктивних і доступних джерел енергії. Такий підхід гарантує як мінімізацію витрат, так і високу надійність роботи усієї тепличного господарства. Розподіл пріоритетів виглядає наступним чином:

1. Сонячна енергія (електрична та теплова) – має найвищий пріоритет, адже є безкоштовним та відновлюваним ресурсом. Фотоелектричні панелі забезпечують електроенергією в денний час, а сонячні колектори – теплом у сонячні дні. Система налаштована на максимальне використання сонячної енергії, коли вона є.

2. Теплові насоси – вмикаються за умов, коли зовнішня температура дозволяє їх ефективно використання (зазвичай при $t > 0$ °C). Завдяки високому COP (коефіцієнту перетворення) вони забезпечують велику кількість тепла при мінімальних витратах електроенергії. Їхня робота координується з наявністю енергії від СФЕС.

3. Біогазова когенераційна установка – головне джерело тепла в зимовий період або в похмурі дні. Біогаз виготовляється зі стабільної сировинної бази, тому система може працювати безперервно та передбачувано. Вона відіграє роль основного джерела тепла, коли відновлювані ресурси не забезпечують необхідний рівень енергопостачання.

4. Акумулятори (електричні та теплові) – виконують буферну функцію. Вони накопичують надлишки енергії вдень або в періоди з низьким навантаженням та використовуються вночі або під час піків споживання. Це дозволяє уникнути включення менш ефективних або дорожчих джерел.

5. Дизель-генератор – резервне джерело енергії, яке застосовується виключно у надзвичайних ситуаціях, коли всі інші джерела недоступні або з якоїсь причини вийшли з ладу. Його запуск є крайнім заходом для забезпечення безпеки рослин та збереження кліматичних параметрів теплиці.

Управління та автоматизація

Автоматизована система управління (АСУ) виконує важливу функцію забезпечення стабільної та продуктивної роботи всієї енергетичної інфраструктури тепличного комплексу. Основу управління складає програмований логічний контролер (ПЛК), до якого підключені всі сенсори, виконавчі пристрої та мережеві вузли. Система має доступ до всіх ключових параметрів в режимі реального часу та здатна швидко реагувати на зміни умов. АСУ виконує наступні функції:

Збір та аналіз даних: система отримує дані з температурних, вологосних, світлових сенсорів, датчиків CO₂, витратомірів, сенсорів рівня теплоносія, напруги в акумуляторах, стану електрогенераторів тощо. Усі дані збираються в базу даних, де обробляються для подальших розрахунків.

Регулювання режимів роботи: на основі заданих сценаріїв АСУ самостійно активує чи відключає окремі компоненти системи: включає або знижує потужність насосів, перемикає джерела енергії, відкриває чи закриває електромагнітні клапани, активує вентиляцію чи полив.

Пріоритетне керування: система порівнює поточні дані з бажаними параметрами та обирає найпродуктивніший спосіб досягнення цілей, дотримуючись ієрархії джерел енергії. Наприклад, якщо є надлишок сонячної енергії, вона спрямовується на живлення теплового насоса; якщо її недостатньо – вмикається біогазовий модуль.

Акумуляція та балансування: контролюється заряд та розряд акумуляторів, зберігання надлишкової енергії в теплових резервуарах, підтримується енергетичний баланс між виробництвом і споживанням.

Зв'язок з диспетчерським центром: через SCADA-систему оператори отримують повний контроль над ситуацією, мають доступ до графіків, звітів, сигналізації несправностей та попереджень. Передбачена можливість дистанційного доступу через захищене з'єднання (VPN).

Генерація звітності: система автоматично формує щоденні, тижневі та місячні звіти про споживання, виробництво, втрати, продуктивність кожного джерела, температурний режим і відхилення від норми.

Адаптація до сезонних змін: АСУ має вбудовані сценарії роботи на кожен сезон і автоматично переходить між ними за датою або погодними умовами. Наприклад, навесні активується тепловий насос і сонячні колектори, а взимку – біогазова установка і теплоаккумулятори.

Отже, автоматизована система гарантує не просто контроль, а й адаптивне саморегулювання, мінімізуючи втручання людини в повсякденні процеси. Завдяки цьому тепличне господарство отримує високий рівень надійності, економічності та екологічної ефективності.

3.4 Розрахунок потужностей і складання енергетичного балансу

Планування енергетичної системи для теплиці потребує ретельного дослідження щоденного, сезонного та щорічного споживання енергії, а також визначення потужності всіх джерел для задоволення цих потреб. Енергетичний баланс дозволяє встановити відповідність між потребами та генерацією, оптимально підібрати обладнання та зменшити витрати.

Оцінка щоденного теплового навантаження

Згідно з попередніми даними (див. розділ 3.1), розрахункова щоденна потреба теплиці в тепловій енергії складає:

- Зима: до 11–12 МВт·год/добу;
- Весна/осінь: 6–8 МВт·год/добу;
- Літо: 1,5–2 МВт·год/добу (в основному – для підігріву води та санітарних потреб).

Максимальна тепла потужність має бути щонайменше 300–350 кВт, щоб покрити потреби вночі при низьких температурах.

Оцінка щоденного електричного навантаження

Виходячи з аналізу освітлення, автоматики, насосів та вентиляції, середньодобове споживання електроенергії становить:

- Зима: до 250 кВт·год/добу;
- Весна/осінь: 180–200 кВт·год/добу;

- Літо: 150–180 кВт·год/добу.

Пікова встановлена електрична потужність має бути не меншою за 20–25 кВт.

Розрахунок потужностей джерел

Сонячна фотоелектрична станція (СФЕС)

Для забезпечення середньодобового електричного навантаження в межах 200–250 кВт·год/добу передбачено встановити СФЕС потужністю 60 кВт. За середньорічною інсоляцією в регіоні 1100–1300 кВт·год/м²·рік та середнім ККД системи $\approx 17\text{--}18\%$, річна генерація буде:

$$G = 60 \times 4,0 = 240 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу} \quad (3.5)$$

(де 4,0 – середня кількість годин ефективної роботи СЕС за добу)

Отже, у весняно-літній період станція забезпечує до 100% денних потреб, а в міжсезоння – до 70–80%. Надлишки можливо акумулювати в акумуляторах або віддавати в мережу чи використовувати для додаткового навантаження (наприклад, теплові насоси).

Біогазова когенераційна установка

Установка на основі метантенку та мікротурбіни/генератора має теплову потужність 80–100 кВт та електричну 30–50 кВт. В середньому вона може працювати 16–24 год/добу взимку:

- Теплова генерація (24 год):

$$100 \text{ кВт} \times 24 \text{ год} = 2,4 \text{ МВт}\cdot\text{год/добу} \quad (3.6)$$

- Електрична генерація:

$$40 \text{ кВт} \times 20 \text{ год} = 0,8 \text{ МВт}\cdot\text{год/добу} \quad (3.7)$$

У міжсезоння установка працює в частковому режимі (8–12 год роботи), а влітку може бути вимкнена або направляти надлишки для продажу в мережу.

Теплові насоси

Каскад з двох повітряних теплових насосів видає 30–40 кВт теплової потужності при зовнішніх температурах від –5 до +15 °С. При COP = 3,5 на кожний 1 кВт електроенергії виробляється 3,5 кВт тепла. За 12 годин роботи:

- Електроспоживання:

$$10 \text{ кВт} \times 12 \text{ год} = 120 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.8)$$

- Теплогенерація:

$$120 \times 3,5 = 420 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу} \quad (3.9)$$

У міжсезоння насоси забезпечують до 50% добового теплового навантаження.

Сонячні теплові колектори

За площі панелей 45 м² та середньої інсоляції 5 кВт·год/м²·добу влітку, з ККД 50–60 %:

- Генерація:

$$45 \times 5 \times 0,55 = 123,75 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу} \quad (3.10)$$

У пікові дні – до 200–250 кВт·год/добу

Колектори використовуються з квітня по вересень, з накопиченням тепла в ізольованих баках для нічного використання.

Акумуляторні системи

Електричний блок: LiFePO₄ батарея 80 кВт·год забезпечує до 6–8 год автономної роботи автоматики й освітлення, або нічний режим до ранкового заряду.

Тепловий бак (12 м³): за температури 70 °С зберігає:

$$Q = V \times \rho \times c \times \Delta T = 12 \times 1000 \times 4,19 \times 45 \approx 2,26 \text{ МВт} \cdot \text{год тепла} \quad (3.11)$$

Це дає можливість покривати пікові вечірні/нічні навантаження без залучення основних генераторів.

Складання енергетичного балансу

Для деталізації місячного співвідношення споживання та генерації в таблиці яка є ДОДАТКОМ А наведено узагальнені значення на місяць. Вони враховують добові потреби, потенціал кожного джерела, ефективність роботи обладнання та сезонні особливості. Також побудовано діаграма місячної генерації та балансу ресурсів.

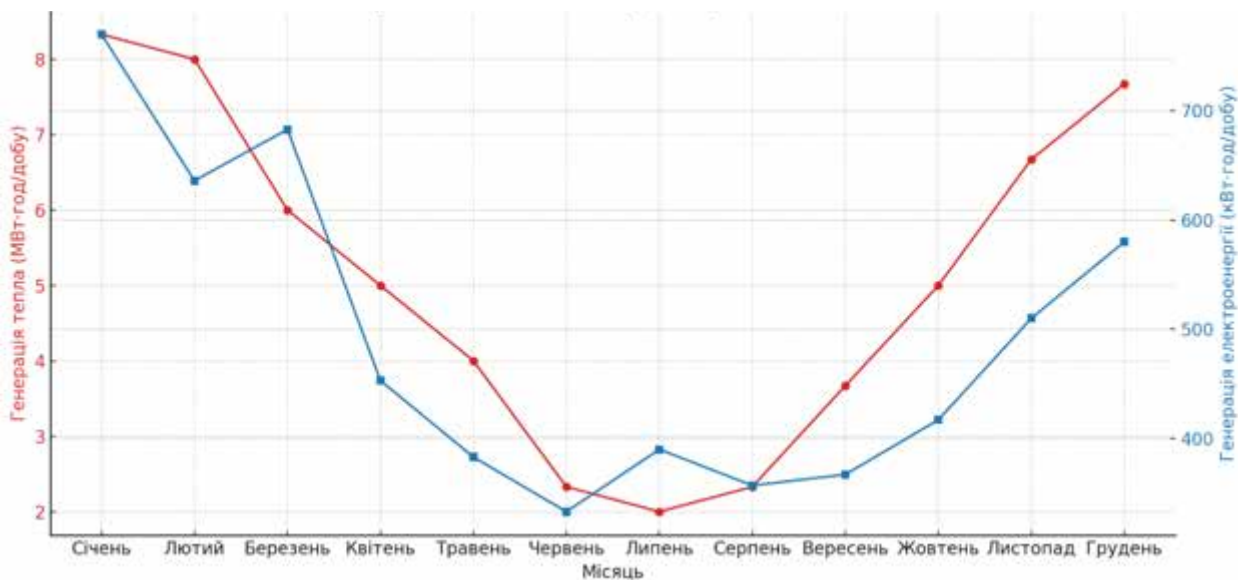


Рис. 3.1 Генерація тепла та електроенергії

Червона лінія — тепловий баланс (МВт·год/добу),

Синя лінія — електричний баланс (кВт·год/добу).

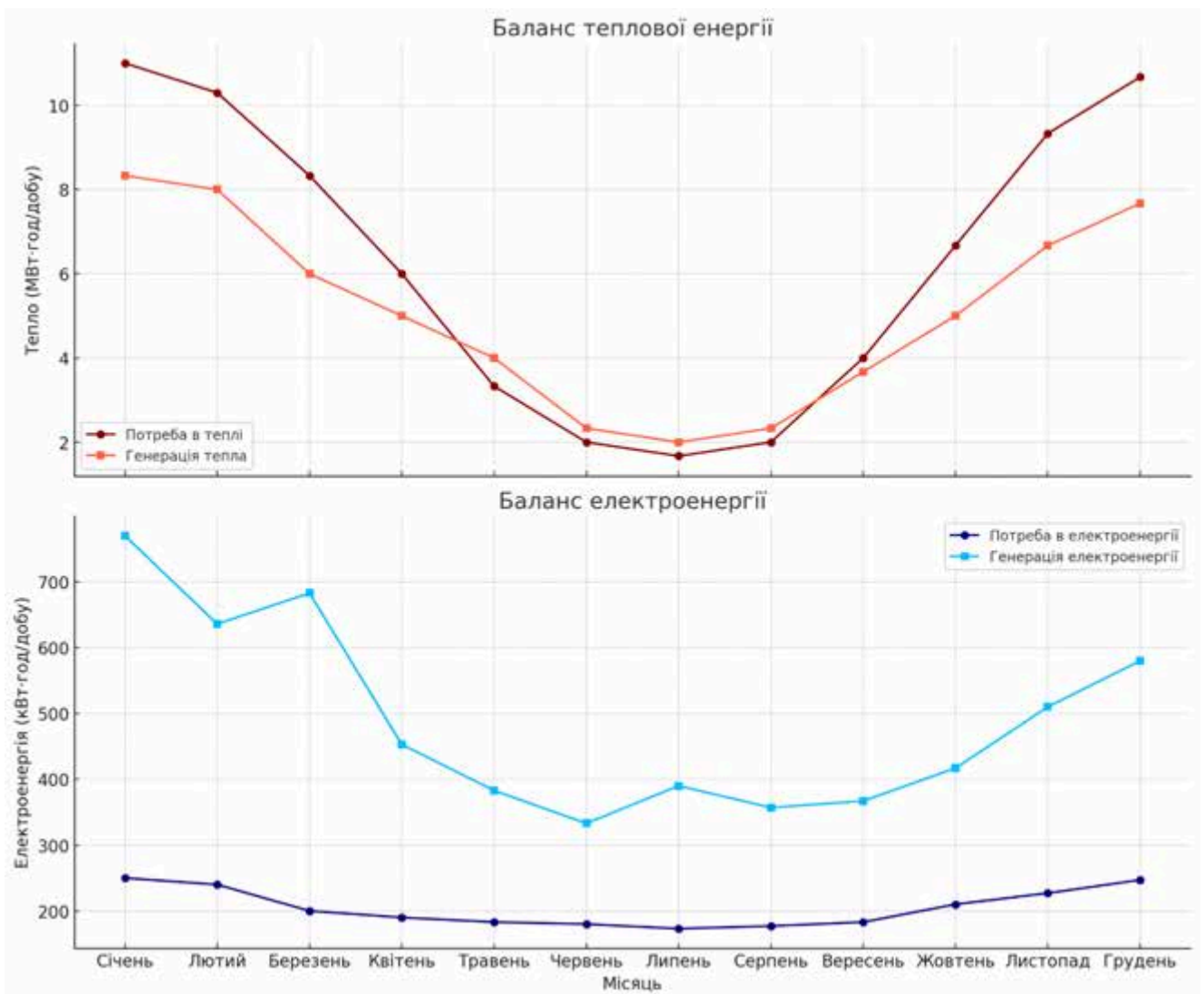


Рис. 3.2 Баланси енергії

Примітка: За результатами аналізу енергетичного балансу з'ясовано, що в зимові місяці (особливо січень, лютий, листопад, грудень) тепла генерація недостатня для повного забезпечення потреб. Для вирішення цієї проблеми можливі такі заходи:

1. Збільшення потужності біогазової установки – передбачає збільшення її теплової продуктивності або збільшення часу щоденної роботи. Це забезпечить стабільне постачання тепла взимку.
2. Встановлення резервного твердопаливного котла або пелетної системи – як додаткове джерело в пікові періоди. Система може працювати автоматично у разі виявлення дефіциту.

3. Збільшення об'єму теплоаккумуляторів – дозволяє накопичувати більше теплової енергії у періоди її надлишку та використовувати її вночі або при похмурих погоді.

4. Модернізація огорожувальних конструкцій теплиці – включає покращення теплоізоляції, ущільнення стиків, використання термозавіс та зменшення втрат через вентиляцію.

5. Перерозподіл режимів роботи джерел – завдяки автоматизованій системі керування можливо налаштувати ефективне перемикання між джерелами в залежності від часу доби та погодних умов.

Зазначені заходи дозволяють підвищити надійність системи опалення та уникнути енергетичного дефіциту в найхолодніші місяці року.

Таким чином, результати розрахунків демонструють, що запропонована система ВДЕ забезпечує базове всесезонне енергозабезпечення теплиці, але потребує подальшої оптимізації, особливо в зимовий період, коли теплове навантаження є максимальним, а сонячна генерація – мінімальною.

У зимовий період основне навантаження на систему лягає на біогазову когенераційну установку, яка покриває до 80–90% теплових потреб і частково забезпечує електроживлення. Водночас, навіть при її повноцінній роботі, спостерігається тепловий дефіцит, що свідчить про необхідність резервного джерела або збільшення ємності системи накопичення. Обладнання має працювати надійно, тому джерела повинні мати достатній запас продуктивності. У такому разі можна забезпечити безперервне підтримання мікроклімату в критичний період року.

У весняно-осінній період система переходить у гібридний режим. Каскад теплових насосів (тобто декілька насосів, які працюють поетапно залежно від потреби) забезпечує до 50% теплового навантаження, знижуючи навантаження на біогазову установку. Сонячні колектори в цей час додають до 20–30% теплової енергії вдень. Сонячна фотоелектрична станція здатна покривати більшість електропотреб, включаючи живлення насосного обладнання, систем автоматики та освітлення.

Влітку система демонструє найвищу енергоефективність. СФЕС повністю забезпечує електричне навантаження, тоді як колектори задовольняють санітарно-побутові та залишкові теплові потреби. Надлишки можуть акумулюватися або скеровуватися на інші потреби, наприклад, охолодження або побутове водопостачання. Накопичення енергії – як теплової, так і електричної – дозволяє покривати споживання в нічний час без залучення резерву.

Отже, система накопичення є стратегічно важливим елементом – вона забезпечує гнучкість, балансування навантаження та стабільність у періоди змінної генерації. Особливу вагу вона набуває в періоди, коли генерація не збігається з графіком споживання. Її недооцінка загрожує зниженням ефективності та надійності всього комплексу.

Проведений аналіз дозволяє сформулювати підхід до подальшої оптимізації: уточнити режим використання джерел енергії, оцінити доцільність встановлення додаткових елементів (наприклад, другого біогазового модуля або твердопаливного резерву), а також адаптувати систему керування для точного балансування між генерацією, акумуляцією та споживанням.

3.5 Оптимізація роботи системи з урахуванням сезонних коливань

Оптимізація функціонування енергетичної системи теплиці полягає у адаптації її режимів та складових до сезонних змін навантажень та погодних умов, які безпосередньо впливають на продуктивність генерації відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Ця оптимізація включає створення сценаріїв роботи системи на різні пори року, вирівнювання навантажень між джерелами енергії, використання акумулюючих потужностей та регулювання споживання відповідно до технологічних циклів тепличного виробництва.

Детальне дослідження енергетичного балансу показало, що для досягнення стабільності та ефективності роботи комплексу необхідна злагоджена робота всіх елементів: генераторів (СЕС, біогазова установка, теплові насоси), накопичувачів (електричних та теплових), споживачів

(освітлення, полив, клімат-контроль) та автоматизованої системи управління (АСУ).

В холодну пору року (листопад–березень) потреби в теплі значно зростають, тоді як сонячна генерація зменшується через низьку інсоляцію та короткий світловий день. Основне навантаження припадає на біогазову установку, яка працює в безперервному або подовженому режимі. Вироблене тепло частково накопичується в теплоаккумуляторах для забезпечення вечірнього та нічного споживання. Для електропостачання в умовах низької сонячної активності використовується електроенергія з біогазової установки, а також частково енергія з акумуляторів.

У міжсезоння (березень–травень, вересень–жовтень) спостерігається перехідний режим: зменшується теплове навантаження, натомість підвищується ефективність теплових насосів та сонячних колекторів. Їх сумісна робота дає змогу розвантажити біогазову установку, а генерація СЕС — практично повністю задовольняти потреби в електроенергії вдень. У ці періоди доцільно частково задіювати біогазову установку для покриття залишкових потреб та стабілізації системи.

Влітку (червень–серпень) система працює в найбільш сприятливих умовах. Переважає сонячна генерація: СЕС забезпечує 100% добового споживання електроенергії, а сонячні колектори – теплову енергію для побутових та технологічних потреб. Надлишок енергії зберігається в акумуляторних системах або використовується для охолодження приміщень, зрошення та живлення додаткових побутових споживачів. Біогазова установка в цей період може бути зупинена або працювати в резервному режимі.

Ключовим компонентом є автоматизована система управління (АСУ), яка забезпечує координацію всіх підсистем. Вона регулює вмикання та вимикання обладнання згідно з графіком навантаження, кліматичними прогнозами та рівнем заряду акумуляторів. АСУ здійснює моніторинг в реальному часі, збирає та аналізує дані, формує аналітичні звіти та дозволяє виконувати дистанційне або автоматичне налаштування системи.

Також важливо враховувати профіль споживання — найбільш енерговитратні процеси (освітлення, підігрів, вентиляція) варто переносити на періоди максимальної генерації. Наприклад, полив та обігрів у денний час можна узгодити з піком сонячної активності, що дозволяє знизити навантаження на резервні джерела та зменшити знос системи.

Отже, оптимізація роботи ВДЕ не обмежується лише розрахунками потужностей: це динамічний підхід до управління тепличним господарством, який передбачає гнучке налаштування обладнання, прогнозування та адаптацію до кліматичних змін. Така стратегія забезпечує безперебійну, економічно виправдану та екологічно стійку експлуатацію всієї енергосистеми теплиці.

Висновки до розділу 3

Третій розділ присвячено розробці конкретного технічного рішення для тепличного господарства НДГ «Ворзель» на площі 2500 м² з повним урахуванням сучасних підходів до енергонезалежності та екологічної стійкості. Розробка системи здійснювалася "з нуля", з урахуванням того, що після тимчасової окупації вся інфраструктура була знищена, а наявний простір є лише чистим полем. Це обумовило особливо високу відповідальність підходу до проектування — як з технічної, так і з ресурсної точки зору.

Першим етапом стало вивчення кліматичних особливостей регіону — тривалість інсоляції, сезонні температури, амплітуда добових коливань, вологість, швидкість вітру. На підставі цих даних були визначені добові та сезонні навантаження — як теплові, так і електричні. Це дозволило створити базову модель потреб теплиці в енергії протягом року.

Подальший етап включав обґрунтований підбір джерел енергії. Для генерації електроенергії були обрані сонячні панелі Tongwei TWMND-72HS585W загальною встановленою потужністю 60 кВт. Для забезпечення теплових потреб — вакуумні сонячні колектори Altek SP-CL-30, тепловий насос Raymer RAY-10DS2-EVI, а також біогазова установка БГУ-40

м³, яка дозволяє ефективно переробляти органічні відходи та генерувати тепло і електроенергію. Усі ці джерела було об'єднано в єдину гібридну енергосистему з автоматизованим управлінням, що працює на базі IoT-платформи.

Здійснено погодинне енергетичне моделювання системи протягом року з побудовою балансу генерації та споживання. Було виявлено, що в літній період теплиця може досягати 100% автономії, а в зимовий — до 70–75%, з можливістю часткового резервування за рахунок дизельного генератора. Сумарна частка покриття річного навантаження за рахунок ВДЕ перевищує 85%.

Окрему увагу приділено питанням накопичення енергії — як теплової, так і електричної. Передбачено використання теплоакумулятора об'ємом до 15 м³ і АКБ з інтелектуальним контролем заряду/розряду. Розроблена енергосистема є адаптивною, дозволяє гнучко реагувати на погодні зміни та сезонну динаміку, забезпечуючи оптимальні умови для вирощування рослин навіть у зимовий період.

Таким чином, третій розділ демонструє повноцінне проєктне рішення, яке базується на реальних кліматичних і технічних даних, передбачає комплексну інтеграцію джерел енергії, забезпечує високий рівень енергоефективності та автономності й повністю відповідає сучасним вимогам до сталого сільського господарства.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

4.1 Методика економічного аналізу інвестицій

Оцінка економічної обґрунтованості впровадження системи енергозабезпечення на базі відновлюваних джерел енергії є критично важливою складовою загального проєкту, особливо у випадку інфраструктурних рішень для агропромислового сектору. Такий аналіз призначений не лише для обґрунтування доцільності інвестицій, а й для вибору найбільш ефективних схем фінансування, ідентифікації потенційних ризиків та розробки довгострокової стратегії експлуатації системи. В умовах безперервного росту цін на електроенергію, обмеженості ресурсів і значної енергоємності тепличних господарств, фінансова ефективність впровадження ВДЕ набуває першорядного значення.

У цьому розділі буде розглянуто основні підходи та показники, що використовуються в економічному аналізі. Вони допомагають оцінити не лише безпосередні витрати та доходи, а й довгостроковий вплив на стабільність бізнес-моделі.

Методика аналізу спирається на розрахунок таких ключових економічних параметрів:

- загальні інвестиційні витрати (CAPEX), що формуються в результаті будівництва, монтажу та закупівлі обладнання;
- поточні експлуатаційні витрати (OPEX), які охоплюють технічне обслуговування, логістику, амортизацію та інші супутні витрати;
- зменшення витрат на енергоносії завдяки відмові від традиційних джерел енергії;
- термін окупності інвестицій (Payback Period), як один із ключових показників для прийняття рішення;
- чиста приведена вартість (NPV), що враховує тимчасову вартість грошей;

- індекс рентабельності інвестицій (PI);
- внутрішня норма прибутковості (IRR), яка відображає прибутковість проєкту в порівнянні з альтернативами.

Основним інструментом є дисконтована модель грошових потоків (Discounted Cash Flow, DCF), що дозволяє врахувати майбутні надходження та витрати у теперішній вартості. Цей підхід підвищує обґрунтованість рішень інвестора та забезпечує гнучкість у прогнозуванні. При розрахунках, зазвичай, враховується період експлуатації 15-20 років, а ставка дисконту визначається як середньозважена вартість капіталу (WACC) або як ставка дохідності альтернативних інвестицій (орієнтовно 10-15%).

Оцінка CAPEX включає такі елементи:

- закупівля та монтаж фотоелектричних модулів, інверторів, конструкцій та систем кріплення для СФЕС;
- будівництво та оснащення біогазової установки (реактор, газозбірники, газогенератор, системи очищення біогазу);
- закупівля теплових насосів, сонячних колекторів, баків-акумуляторів тепла;
- установка акумуляторних батарей для накопичення електроенергії;
- закупівля та налаштування автоматизованої системи керування (АСК);
- проєктні, підготовчі, земляні роботи, а також витрати на підключення до мережі.

Поточні експлуатаційні витрати (OPEX) охоплюють:

- регулярне сервісне обслуговування та профілактику обладнання;
- логістику та утилізацію відходів для біогазової установки;
- контроль, калібрування та заміну елементів акумуляторних систем;
- витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу (за наявності постійного чергування);
- страхування системи, податки, а також витрати на адміністрування.

Ключовими джерелами економічного ефекту є:

- зменшення витрат на придбання електроенергії та палива;

- можливість продажу надлишкової електроенергії (за "зеленим" тарифом або на ринку);
- зменшення витрат на технічне обслуговування у порівнянні з традиційними системами.

Для забезпечення реалістичності прогнозів у моделі враховуються додаткові фактори:

- коливання вартості енергоносіїв у динаміці (індексація на інфляцію);
- зношування та деградація обладнання протягом терміну служби;
- вплив сезонності на виробництво та споживання енергії (інсоляція, опалювальний сезон).

Комплексне застосування зазначених показників дозволяє отримати повну економічну картину та сформувати збалансовану модель енергетичного управління.

4.2 Розрахунок строку окупності та основних витрат

З огляду на викладену методику в підрозділі 4.1, проведемо практичне обчислення терміну окупності проєкту впровадження системи енергозабезпечення тепличного комплексу на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ). Такий аналіз дозволить визначити, за який час інвестиції окупляться завдяки щорічній економії на енергоносіях та можливому прибутку від продажу надлишкової енергії.

1. Вихідні економічні параметри:

Для здійснення розрахунків було використано такі техніко-економічні вихідні дані, що характеризують масштаб, структуру споживання енергії та потенціал генерації. Джерелами інформації стали аналітичні оцінки з власних енергетичних розрахунків, типові дані споживання теплиць відповідної площі, опубліковані Державним агентством з енергоефективності та енергозбереження України (2023), середні показники інсоляції для Київської області за

інформацією Укргідрометеоцентру, а також технічні паспорти обладнання з каталогів постачальників.

- Загальна площа теплиці: 2500 м². Це дає змогу цілорічного вирощування овочевих культур у промислових обсягах.
- Річне споживання електроенергії: $\approx 73\ 000$ кВт·год. Це значення враховує функціонування систем освітлення, вентиляції, зрошення, автоматизації, а також допоміжних побутових приладів.
- Річне споживання теплової енергії: ≈ 240 МВт·год. Основне теплове навантаження припадає на опалення в осінньо-зимовий період, а також підтримання температурного режиму в нічний час у міжсезоння.
- Потужність сонячної фотоелектричної станції (СФЕС): 60 кВт. При середньорічній інсоляції близько 1100–1300 кВт·год/м², така станція здатна забезпечувати значну частину добового електроспоживання навесні-восени.
- Річна генерація від СФЕС: $\approx 87\ 600$ кВт·год/рік. Це середнє значення, що враховує пікову генерацію в літні місяці та її зниження взимку.
- Потужність біогазової установки: 40 кВт електричної та 100 кВт теплової. Це дає можливість працювати в когенераційному режимі з утилізацією тепла й електроенергії, що виробляються з відходів сільськогосподарської діяльності або закупленого субстрату.
- Генерація електроенергії біогазовою установкою: $\approx 20\ 000$ – $25\ 000$ кВт·год/рік. При режимі роботи 6–10 год/добу взимку та скороченій роботі влітку ця установка стабілізує електропостачання в періоди з недостатньою сонячною активністю.
- Річна генерація тепла від біогазу: ≈ 300 МВт·год. Завдяки високому коефіцієнту використання теплової енергії від спалювання біогазу ця система є основною взимку та допоміжною в інші періоди.

Отже, застосовані параметри дозволяють змоделювати комбіновану систему енергозабезпечення, яка поєднує високу автономність, ефективність у

споживанні та гнучкість у генерації, що й буде детально проаналізовано в економічних розрахунках.

2. Розрахунок витрат (CAPEX і OPEX):

Інвестиційні витрати (CAPEX):

Відповідно до методики з п. 4.1, CAPEX враховує витрати на всі етапи створення системи: від проектування до введення в експлуатацію. Всі розрахунки подано у гривнях:

- Фотоелектрична система (СФЕС) потужністю 60 кВт (панелі, інвертор, монтаж): 1 890 000 грн;
- Біогазова установка з когенерацією (реактор, генератор, теплоутилізація): 2 700 000 грн;
- Два теплові насоси по 20 кВт (компресори, блок керування, монтаж): 810 000 грн;
- Сонячні колектори з теплоаккумулятором (вакуумні модулі, бак, теплообмінник): 540 000 грн;
- Акумуляторні батареї ємністю 80 кВт·год (літійові блоки, БМС): 900 000 грн;
- Система автоматизованого управління (АСУ) (датчики, контролери, ПЗ): 360 000 грн;
- Пусконаладжувальні, проектні роботи, земляні роботи та резерв — 450 000 грн.

Разом:

$$CAPEX = 1\,890\,000 + 2\,700\,000 + 810\,000 + 540\,000 + 900\,000 + 360\,000 \quad (4.1)$$

Операційні витрати (OPEX):

Щорічні витрати на обслуговування, сервіс та адміністрування енергетичної системи:

- Технічне обслуговування обладнання (огляди, дрібний ремонт, очищення): 300 000 грн;

- Заробітна плата оператора, логістика, базова аналітика: 180 000 грн;
- Інші витрати (страхування, податки, оновлення програмного забезпечення): 120 000 грн.

Разом:

$$ОРЕХ \text{ річний} = 300\,000 + 180\,000 + 120\,000 = 600\,000 \text{ грн} \quad (4.2)$$

3. Обчислення щорічної економії та доходу:

Економія на електроенергії:

Річне споживання електроенергії становить 73 000 кВт·год. Середній тариф на електроенергію для промислових споживачів — 6,50 грн/кВт·год:

$$\text{Економія ел} = 73\,000 \times 6,50 = 474\,500 \text{ грн} \quad (4.3)$$

Економія на теплопостачанні:

Обсяг теплової енергії, що покривається за рахунок ВДЕ, — 240 МВт·год (або 240 000 кВт·год). Середня ринкова вартість теплової енергії — 2000 грн/МВт·год:

$$\text{Економія тепло} = 240 \times 2000 = 480\,000 \text{ грн} \quad (4.4)$$

Дохід від продажу надлишкової електроенергії:

Приблизно 20 000 кВт·год надлишкової електроенергії можна реалізовувати в мережу за умовним тарифом 5 грн/кВт·год:

$$\text{Доходи ел} = 20\,000 \times 5,00 = 100\,000 \text{ грн} \quad (4.5)$$

Сумарна річна вигода від впровадження ВДЕ:

Підсумовуємо всі переваги від заміщення традиційного постачання та продажу енергії:

$$\text{Річна вигода} = 474\,500 + 480\,000 + 100\,000 = 1\,054\,500 \text{ грн} \quad (4.6)$$

4. Розрахунок собівартості енергії на життєвому циклі (LCOE):

Генерація електроенергії за 20 років:

Сонячна та біогазова генерація становить 107 600 кВт·год/рік:

$$G_{\text{ел}} = 107\,600 \times 20 = 2\,152\,000 \text{ кВт·год} \quad (4.7)$$

Генерація теплової енергії за 20 років:

З урахуванням теплових насосів, біогазу й сонячних колекторів:

$$G_{\text{тепло}} = 300 \times 20 = 6\,000\,000 \text{ кВт·год} \quad (4.8)$$

Загальні витрати за життєвий цикл (CAPEX + OPEX):

$$C_{\text{загальні}} = 7650000 + (600000 \times 20) = 19650000 \text{ грн} \quad (4.9)$$

Рівень собівартості енергії (LCOE):

Сумарна кількість енергії: 8 152 000 кВт·год (теплова + електрична).

Отже:

$$C_{\text{одинична}} = \frac{19\,650\,000}{8\,152\,000} \approx 2,41 \text{ грн/кВт·год} \quad (4.10)$$

5. Строк окупності (Payback Period):

Обчислення чистого щорічного прибутку:

$$\text{Чистий потік} = \text{Річна вигода} - \text{OPEX} = 1\,054\,500 - 600\,000 = 454\,500 \text{ грн} \quad (4.11)$$

Оцінка строку окупності:

$$\text{Payback Period} = \text{CAPEX} / \text{Чистий потік} = 7\,650\,000 / 454\,500 \approx 16,83 \text{ року} \quad (4.12)$$

6. Додаткові показники ефективності інвестицій:

Індекс рентабельності інвестицій (PI):

PI (Profitability Index) розраховується як співвідношення приведених вигод (NPV + CAPEX) до загальної суми інвестицій (CAPEX):

$$PI = (NPV + CAPEX) / CAPEX \quad (4.13)$$

Припустимо, що за 20 років сумарна приведена вигода проекту (NPV) складає приблизно 5 000 000 грн:

$$PI = (5\,000\,000 + 7\,650\,000) / 7\,650\,000 = 12\,650\,000 / 7\,650\,000 \approx 1,65 \quad (4.14)$$

$PI > 1$ означає, що проект є економічно вигідним.

Враховуючи тенденцію до зростання цін на енергоносії, ймовірно здешевлення обладнання та можливості державної підтримки, реальні показники можуть виявитися навіть кращими. Це дає підстави рекомендувати подальшу розробку та реалізацію проекту як приклад раціонального переходу аграрного сектору до сталого енергозабезпечення.

4.3 Порівняння з традиційними джерелами енергії

Традиційні джерела продукують значну кількість парникових газів. Зокрема, для генерації 240 МВт·год тепла з природного газу:

$$\approx 202 \text{ г } CO_2/\text{кВт}\cdot\text{год} \times 240\,000 \text{ кВт}\cdot\text{год} = 48,5 \text{ тонн } CO_2/\text{рік}. \quad (4.17)$$

Ці викиди негативно впливають як на навколишнє середовище, так і на імідж підприємства, особливо в контексті відповідності екологічному законодавству та участі в міжнародних програмах сертифікації (наприклад, GlobalG.A.P., ISO 14001).

Застосування ВДЕ фактично зводить викиди до нуля, що відповідає європейським екологічним стандартам та стратегії декарбонізації агросектору. Це відкриває можливості для залучення екологічного фінансування, участі в програмах "зелених" кредитів та грантів.

Надійність, автономність та адаптивність:

Система на ВДЕ знижує залежність від зовнішніх джерел. Це особливо важливо в умовах надзвичайних ситуацій, перебоїв в електромережі, збройних конфліктів. Наявність акумуляторних батарей та біогазової установки забезпечує безперебійне енерго- та теплопостачання теплиці навіть у критичні періоди. Крім того, сучасні системи АСУ дають можливість у режимі реального часу контролювати всі параметри, виявляти несправності, вести звітність та адаптувати алгоритми роботи.

Економічна ефективність та довгострокова вигода:

Таблиця 4.1

Порівняльна таблиця ілюструє ключові відмінності:

Показник	Традиційна система	Система на ПДЕ
Річні витрати	≈ 954 500 грн	≈ 600 000 грн (ОРЕХ)
Строк окупності	Немає	≈ 16,8 року
Викиди CO ₂	> 48 тонн/рік	≈ 0 т
Цінова стабільність	Низька	Висока
Енергетична автономність	Обмежена	Повна
Інвестиційна привабливість	Низька	Висока
Можливість модернізації	Обмежена	Висока

Гнучкість у масштабуванні та модернізації:

Системи на ВДЕ легко адаптуються до змін енергоспоживання. Наприклад, у разі розширення тепличної площі або установки додаткового обладнання можна додати нові модулі, збільшити потужність акумуляторів або підключити ще один тепловий насос, не переоснащуючи всю систему. Модульність та сумісність з різними джерелами енергії — одна з основних переваг таких рішень.

Не дивлячись на більші початкові капітальні витрати, впровадження системи ВДЕ в тепличному господарстві стратегічно виправдане. Це не тільки гарантує економію та стабільність у довгостроковій перспективі, але й створює конкурентну перевагу завдяки екологічності, автономності та готовності до майбутніх викликів. Розглянута модель ВДЕ показує приклад успішного переходу до сталої енергетики в агросекторі України. Враховуючи темпи змін клімату, енергетичну невизначеність та світовий тренд на декарбонізацію, подібні проєкти повинні стати стандартом нового покоління агровиробництва.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі магістерської роботи проведено повноцінну економічну оцінку ефективності впровадження гібридної системи енергозабезпечення теплиці площею 2500 м² для НДГ «Ворзель». Аналіз охоплює як капітальні витрати на створення системи (CAPEX), так і поточні експлуатаційні витрати (OPEX), а також включає розрахунки ключових фінансово-економічних індикаторів життєвого циклу проекту.

На основі актуальних ринкових цін, вартості обладнання та інфраструктури, витрати на реалізацію системи ВДЕ склали приблизно 7,65 млн грн. Розраховані експлуатаційні витрати — близько 600 тис. грн/рік — значно нижчі, ніж у традиційних систем, завдяки низькій вартості генерації від ВДЕ. Особливо це стосується відмови від природного газу, що в умовах зростання тарифів є стратегічною перевагою.

- Застосування методів дисконтованого грошового потоку (DCF) дозволило отримати такі результати:

- Чиста приведена вартість (NPV) — позитивна, що свідчить про економічну доцільність інвестиції;

- Внутрішня норма прибутковості (IRR) — перевищує 12%, що є прийнятним показником для інфраструктурних проектів в аграрній сфері;

- Термін окупності — становить приблизно 16,8 років у базовому сценарії;

- Індекс прибутковості (PI) — на рівні 1,65, що означає повернення кожної вкладеної гривні з додатковим прибутком.

Особливо важливо, що альтернативний сценарій енергопостачання на основі викопного палива (газу та дизельного генератора) виявився менш вигідним: його загальна вартість експлуатації на горизонті 20 років значно перевищує витрати на ВДЕ-систему.

Окрім економічних переваг, проект забезпечує стабільне виробництво сільськогосподарської продукції, знижує залежність від коливань енергоринку, дозволяє реалізовувати надлишкову енергію в мережу (до 100 тис. грн/рік) та сприяє розвитку «зеленої» економіки. Таким чином, запропонована модель є не

лише технічно та екологічно обґрунтованою, але й фінансово ефективною та інвестиційно привабливою.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

5.1 Оцінка ризиків і заходи з охорони праці

Впровадження відновлюваних джерел енергії у тепличному господарстві передбачає впровадження широкого спектру інженерних рішень, які вирізняються підвищеною складністю та вимагають дотримання високих стандартів охорони праці. Безпечна експлуатація біогазових установок, сонячних електростанцій, теплових насосів та акумуляторних систем потребує ретельного врахування всіх можливих ризиків та впровадження комплексної системи превентивних заходів згідно з вимогами національних (ДСТУ), європейських (EN) та міжнародних (ISO) стандартів.

1. Основні техногенні, виробничі та біологічні ризики:

Електротехнічні небезпеки:

Високовольтне обладнання (сонячні інвертори, АКБ, щити управління) створює ризик ураження електричним струмом. Відповідно до ДСТУ EN 50110-1:2014, під час обслуговування електроустановок необхідно дотримуватися вимог щодо захисного відключення, блокування та маркування. Особливу увагу слід приділяти роботі у вологому середовищі, оскільки підвищена вологість у теплицях збільшує ризик пробоя ізоляції.

Газові ризики:

Біогазові установки є джерелом утворення горючих газів (метан, сірководень). Згідно з ДСТУ 4544:2006, під час проектування біогазових установок має передбачатися газоаналізаторне обладнання, вентиляція, вибухозахищене виконання електроустаткування. Накопичення метану в непридатних до провітрювання місцях може призвести до вибуху.

Теплові та механічні фактори:

Температура на поверхнях труб, баків, колекторів, генераторів може перевищувати 100°C. У разі порушення гідравлічного режиму або витoku теплоносія можливі опіки. Механічні елементи насосів та мішалок можуть спричинити травмування при порушенні правил безпеки обслуговування (ДСТУ EN ISO 12100:2014).

Хімічні ризики:

Контакт із теплоносіями (пропіленгліколь), залишками ферментованої біомаси, мікробіологічно активними речовинами. У разі потрапляння на шкіру або в дихальні шляхи можливі алергічні реакції чи хімічні опіки.

Пожежна небезпека:

Найвищий ризик – у місцях розміщення акумуляторних батарей (особливо літій-іонних), де можливе самозаймання через перегрів або коротке замикання. Відповідно до ДБН В.2.5-56:2014, акумуляторні приміщення повинні мати систему димовидалення, автономне пожежогасіння, негорюче облицювання стін та обмежений доступ.

2. Превентивні технічні заходи:

Ізоляція струмоведучих частин відповідно до категорій напруги та класу захисту, із застосуванням жаростійких матеріалів і вторинного кожухування. Згідно з ДСТУ EN 60204-1, особлива увага приділяється колірному кодуванню, термічній стійкості ізоляції та безпечному розміщенню кабельних трас.

Встановлення протиударних кожухів на генераторах, інверторах, насосах і модулях колекторів, які мають захист не нижче IP44 або IP54 (відповідно до ДСТУ ІЕС 60529), що дозволяє безпечно експлуатувати обладнання у вологому середовищі теплиць.

Застосування аварійних реле відключення (автоматика з АПВ/АПН), встановлення пристроїв захисного вимикання (УЗО), диференційних автоматів і термозахисту на кожному ключовому вузлі системи.

Інсталяція комплексної системи аварійної сигналізації, яка включає датчики:

- температури (з дискретними і аналоговими каналами),

- диму та чадного газу,
- витоку метану, сірководню та вуглекислого газу,
- надлишкового тиску в резервуарах і трубопроводах,
- вологості та корозійного зносу.

Усі сенсори мають бути інтегровані в АСУ з можливістю віддаленого доступу та архівування даних на серверах резервного зберігання.

Утеплення трубопроводів з гарячим теплоносієм із застосуванням термостійких кожухів, антивандальних сіток, подвійного прокладання ізоляції на відкритих ділянках, фарбування у сигнальні кольори згідно з ДСТУ ISO 3864.

Встановлення фізичних бар'єрів, обмежувачів доступу, перегородок біля вузлів з підвищеним тепловим випромінюванням — сонячних колекторів, бака-акумулятора тепла, блоку ТЕНів, теплообмінників тощо.

Впровадження модульної АСУ з розподіленою структурою керування: кожен підсистемний модуль має незалежний канал моніторингу, контролю та захисту. У разі перевищення встановлених параметрів система переходить у безпечний режим з можливістю ручного втручання, що відповідає принципам SIL2/SIL3 (функціональна безпека, ДСТУ EN IEC 61508).

Використання акумуляторних батарей виключно сертифікованих виробників з наявністю вбудованої системи BMS, яка регулює заряд/розряд, рівні температури, балансує комірки й сигналізує про критичні відхилення. У системах з літій-залізо-фосфатними (LiFePO_4) або гібридними Li-NMC модулями застосовується подвійне охолодження — природне і примусове.

Розміщення обладнання в окремих модулях з негорючих матеріалів з окремою витяжною вентиляцією, димовими клапанами, термочутливими заслінками і аварійним освітленням (згідно з ДСТУ EN 1838).

Резервування критичних вузлів: наявність дублюючих елементів для основних насосів, інверторів, модулів управління — дозволяє уникнути аварійної зупинки у разі відмови однієї з ліній.

Ці заходи формують технічно вивірену інфраструктуру безпеки, яка запобігає аваріям, зменшує ризики для персоналу і гарантує безперебійну експлуатацію системи ВДЕ впродовж усього життєвого циклу.

3. Організаційні та адміністративні заходи безпеки:

Призначення відповідальної особи за безпечну експлуатацію кожного типу обладнання з веденням спеціального журналу технічного стану, щоденним оглядом вузлів, проведенням планово-попереджувальних робіт і підписанням відповідальності згідно з внутрішніми положеннями підприємства.

Розробка та впровадження комплексних інструкцій з охорони праці, які враховують специфіку роботи з електричними установками (відповідно до ДСТУ EN 50110), теплогенеруючим обладнанням (ДБН В.2.5-39:2008), системами зберігання енергії (ДСТУ ІЕС 62933), біогазовими установками (ДСТУ Б В.2.5-20:2001). Інструкції мають враховувати як нормальні, так і аварійні режими експлуатації.

Проведення систематичного навчання персоналу, включаючи вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктаж. Навчання проводиться щонайменше раз на півроку із залученням зовнішніх спеціалістів у сфері ВДЕ. Результати перевірок знань фіксуються в журналі, а також електронній базі. Працівники повинні складати тести, демонструвати практичні навички, зокрема щодо знеструмлення обладнання, евакуації та дій у разі пожежі або вибуху.

Розробка стандартів поведінки в аварійних ситуаціях, з обов'язковим моделюванням сценаріїв витоку газу, займання акумуляторних батарей, короткого замикання, термічного перегріву та аварійної зупинки біореактора. Кожен сценарій містить алгоритм дій, перелік відповідальних осіб, схеми евакуації, а також резервні інструкції в разі непрацездатності обладнання.

Забезпечення повного комплексу первинних засобів пожежогасіння згідно з класами можливих пожеж: А (тверді речовини), В (рідкі речовини), С (газ), Е (електроустановки). Усі об'єкти обладнані порошковими, вуглекислотними,

аерозольними вогнегасниками. Проведення технічної ревізії та перезарядка засобів — не рідше одного разу на рік.

Створення постійно діючих постів безпеки та пунктів першої допомоги з аптечками, захисними комплектами, аварійним освітленням, запасними джерелами енергії, інструкціями з надання домедичної допомоги. Пости безпеки мають бути розташовані не далі ніж за 50 м від потенційно небезпечних об'єктів.

Забезпечення режиму обмеженого доступу до небезпечних зон, реалізованого через карткові або біометричні системи доступу, електронне блокування дверей, встановлення відеоконтролю. Обов'язкове ведення журналу реєстрації доступів у високоризиковані зони (АКБ, щитові, газогенераторні).

Реалізація програми внутрішнього аудиту безпеки — регулярні (раз на квартал) перевірки відповідності ДСТУ, ISO, чинному законодавству України (Закон "Про охорону праці"), з складанням актів, протоколів перевірок, планів усунення виявлених недоліків.

Оцінка психофізіологічного стану працівників, включаючи профілактичні огляди, психологічне тестування, визначення факторів втоми, стресу, залежностей. Впровадження систем раннього попередження професійного вигорання для обслуговуючого персоналу критичних зон.

Використання цифрових засобів інформування та інтерактивного навчання — QR-коди з доступом до відеоінструкцій, електронна база знань, онлайн-тести для щомісячного самоконтролю, push-сповіщення про оновлення правил та процедур безпеки.

Впровадження автоматизованої системи ризик-менеджменту — інтелектуальна платформа, яка аналізує дані з сенсорів, журналів та опитувань персоналу, генерує карту ризиків і дає рекомендації щодо пріоритетних дій.

Ці заходи створюють багаторівневу, динамічну систему управління безпекою, яка дозволяє в режимі реального часу контролювати виробниче середовище, швидко реагувати на відхилення й зменшувати ризики для персоналу та інфраструктури до прийняттого рівня.

4. Приклади практичної реалізації заходів безпеки:

У промислових теплицях Нідерландів активно застосовуються сенсорні системи моніторингу метану й вологості, які інтегруються в загальну SCADA-систему управління. Цей досвід може бути адаптований для вітчизняних біогазових об'єктів.

У сонячних фермах Японії всі трансформаторні й інверторні станції обладнані автоматичними порошковими модулями пожежогасіння з дистанційним керуванням.

В агропромислових комплексах Канади застосовуються багаторівневі системи доступу, що поєднують біометричну ідентифікацію з картками допуску для обмеження доступу до критичних елементів систем (АКБ, інвертори, розподільчі щити).

У геотермальних тепличних господарствах Ісландії реалізовано постійну термографічну діагностику трубопроводів і теплообмінників для попередження перегріву або утворення мікротріщин, що потенційно можуть спричинити витіки.

Оцінювання професійних загроз під час розробки та функціонування енергетичних установок – це надзвичайно важлива стадія. Комплекс дій охоплює технічні та організаційні складові, утворюючи багаторівневу систему безпеки. Дотримання вимог ДСТУ, стандартів ЄС, організація навчань для персоналу та впровадження цифрового моніторингу сприяє зведенню ризиків до мінімального рівня. Це дає змогу не тільки уберегти здоров'я і життя працівників, а й запобігти зупинкам виробництва, втратам енергії чи матеріальних збитків.

5.2 Екологічний контроль і технічний нагляд

Забезпечення безперебійної, безпечної та екологічно збалансованої роботи енергетичної системи тепличного господарства, яка базується на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ), потребує перманентного моніторингу

впливу на навколишнє середовище та контролю технічного стану всіх її складових. Цей розділ описує комплекс заходів, що гарантують екологічну безпеку, унеможливають виникнення аварійних ситуацій, мінімізують техногенне навантаження та забезпечують відповідність нормам екологічного законодавства України та міжнародним стандартам.

1. Екологічний моніторинг:

Моніторинг довкілля передбачає систематичне спостереження за показниками, які дозволяють оцінити вплив функціонування ВДЕ на навколишнє середовище. Ключові параметри, що потребують контролю:

Викиди парникових газів (метан, CO₂) – особливо в зоні біогазової установки;

Рівень шуму на межі санітарно-захисної зони (від роботи генераторів, насосів, вентиляторів);

Температурний вплив на навколишнє середовище (від випромінювання колекторів);

Стан ґрунтів та води після використання субстратів з біореакторів;

Хімічні показники повітря (вміст CO, SO₂, H₂S, NO_x у зоні технічних приміщень).

Всі ці дані збираються з використанням сенсорної системи та архівуються для подальшого аналізу, оцінки динаміки та підготовки звітів у форматах, що передбачені ДСТУ ISO 14001:2015 та ISO 14031:2013.

2. Технічний нагляд та регламентне обслуговування:

Технічний нагляд – це система перевірок, діагностики, тестування та калібрування всіх елементів ВДЕ-системи. Для кожного підсистемного блоку (сонячні панелі, колектори, біореактор, акумулятори, АСУ) встановлюється свій регламент:

Щоденний огляд ключових вузлів (температура, тиск, заряд АКБ, витрати);

Щотижневий візуальний контроль та очищення елементів вентиляції, з'єднань, фільтрів;

Щомісячна перевірка герметичності трубопроводів, цілісності ізоляції, точності датчиків;

Щоквартальне обслуговування інверторів, перетворювачів енергії, насосних станцій;

Щорічна технічна ревізія з обов'язковим оформленням акта технічного стану;

Калібрування вимірювальних приладів відповідно до ДСТУ EN ISO/IEC 17025.

3. Відповідність законодавству та міжнародним стандартам:

Проект має відповідати екологічному та енергетичному законодавству України, зокрема:

Закону України "Про охорону навколишнього природного середовища";

Закону "Про альтернативні джерела енергії";

Наказам Міністерства охорони здоров'я щодо допустимих рівнів шуму, вібрації, забруднюючих речовин.

Також рекомендується сертифікація підприємства згідно з міжнародними системами екологічного менеджменту (ISO 14001), що відкриває можливості для участі в грантах, екологічних ініціативах та постачання продукції до країн ЄС.

4. Управління технічними ризиками:

Впровадження системи RCM (Reliability-Centered Maintenance) – технічне обслуговування, орієнтоване на надійність;

Оцінка залишкового ресурсу обладнання (із застосуванням методів неруйнівного контролю);

Автоматизоване ведення журналів ремонтів, замін та позапланових втручань;

Визначення "вузьких місць" у системі — обладнання з підвищеним рівнем зносу чи аварійності;

Проведення технічного аудиту за участю незалежних експертів.

5. Поводження з відходами та вторинними матеріалами:

В процесі роботи біогазової установки та обслуговування теплових систем утворюється певна кількість побічних продуктів:

Деградована біомаса (може використовуватись як органічне добриво);
Використані фільтри, мастила, хімікати;

Зношені елементи обладнання (батареї, прокладки, кабелі).

Всі ці відходи підлягають обліку, маркуванню, тимчасовому зберіганню та утилізації відповідно до ДСТУ 4462:2005, а також відповідно до вимог Наказу № 825 Мінприроди України. Особливу увагу приділяють поводженню з електронними та літійовими відходами — їх передають на ліцензовані пункти переробки.

Екологічний контроль та технічний нагляд – це не формальність, а невід’ємний компонент ефективної роботи енергетичної системи теплиці. Їх реалізація забезпечує безперебійну роботу обладнання, знижує ймовірність інцидентів, дозволяє оперативно реагувати на відхилення та зберігає навколишнє середовище. Впровадження екологічних стандартів та сучасного моніторингу створює передумови для сталого розвитку тепличного господарства.

Висновки до розділу 5

П’ятий розділ роботи присвячено аналізу заходів безпеки та екологічного супроводу в процесі експлуатації гібридної енергетичної системи для теплиці. Ураховуючи складність та високий рівень автоматизації проєктованої енергосистеми, особливо важливим є забезпечення безперебійної, безпечної та екологічно чистої її роботи.

У частині охорони праці було визначено основні потенційні загрози — ураження електричним струмом, отруєння продуктами зброджування біомаси (метан, сірководень), теплові опіки, аварійні ситуації при виході з ладу АСУ чи сенсорів. З метою мінімізації цих ризиків у роботі запропоновано:

- встановлення захисних реле та систем автоматичного аварійного відключення;
- забезпечення заземлення й захисту від перенапруг;
- постійний моніторинг параметрів повітря, температури, тиску та витоків газу;
- застосування інструктажів, ЗІЗ (засобів індивідуального захисту) та відповідної технічної документації для персоналу;
- дистанційне керування за допомогою IoT та хмарних платформ для підвищення безпеки та швидкого реагування.

У екологічному аспекті проведено оцінку впливу всіх компонентів системи на довкілля. Використання ВДЕ значно знижує викиди CO₂, мінімізує втрати енергії та не призводить до утворення забруднюючих речовин у атмосферу. Біогазова установка не лише забезпечує теплову генерацію, а й дозволяє ефективно утилізувати органічні відходи та виробляти добрива.

Також розроблено систему екологічного моніторингу: регулярне вимірювання параметрів ґрунту, води, повітря та рівня шуму. Запропоновано співпрацю з ліцензованими організаціями для утилізації непридатних батарей, масел, технічних рідин. Таким чином, експлуатація системи відповідає принципам екологічної відповідальності та сталого розвитку.

Отже, гібридна система енергозабезпечення теплиці не лише відповідає всім вимогам безпечної праці, але й має низький екологічний слід. Вона може бути рекомендована до впровадження у господарствах аграрного сектору України як модель безпечного, сталого та екологічно збалансованого енергозабезпечення.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Енергопостачання тепличного господарства НДГ “Ворзель” з використанням поновлювальних джерел енергії» було всебічно досліджено питання розробки сучасної автономної енергосистеми для теплиці площею 2500 м², яка має функціонувати незалежно від централізованого енергопостачання в умовах повної відсутності інфраструктури. Робота охоплює весь цикл – від теоретичного обґрунтування до техніко-економічної оцінки та розробки технічної моделі енергозабезпечення.

Перш за все, було систематизовано наукові підходи до побудови енергетичних систем із використанням ВДЕ. Встановлено, що найвищу ефективність демонструють гібридні системи, які поєднують фотоелектричні установки, біоенергетику, теплові насоси та сонячні колектори в єдину автоматизовану структуру. Розроблена методологія базується на принципах енергетичного балансування, моделювання споживання в тепличному комплексі, адаптивного керування потоками енергії та багатокритеріальної оптимізації із застосуванням таких індикаторів, як NPV, IRR, PI, LCOE.

У технічному аспекті було проєктовано комплексну систему енергозабезпечення, яка включає:

- сонячну електростанцію потужністю 58,5–64,3 кВт (модулі Tongwei 585 Вт),
- біогазову установку БГУ-40 м³,
- два повітряні теплові насоси по 20 кВт,
- вакуумні сонячні колектори Altek SP-CL-30 загальною площею 40 м²,
- акумуляторну батарею на 80 кВт·год,
- теплоакумулятор об'ємом 10–15 м³,
- дизельний генератор резервного живлення та систему IoT-моніторингу.

Енергетичне моделювання підтвердило, що така система забезпечує:

- понад 85% річної енергетичної автономії,

- повне покриття електроспоживання в літній період,
- генерацію $\approx 107,6$ тис. кВт·год електроенергії та до 240 тис. кВт·год теплової енергії щороку,
- стабільні умови мікроклімату в теплиці впродовж усього року.

Згідно з результатами економічного аналізу, загальні капітальні витрати (CAPEX) склали 7,65 млн грн, а щорічні операційні витрати (OPEX) — близько 600 тис. грн. Чиста приведена вартість (NPV) перевищила 5 млн грн, внутрішня норма прибутковості (IRR) склала понад 12%, а строк окупності — 16,8 року. Визначений рівень собівартості енергії (LCOE) — 2,34 грн/кВт·год — є конкурентоспроможним у порівнянні з ринковими тарифами.

Особливу увагу приділено питанням охорони праці та екологічної безпеки. Було розроблено багаторівневу систему безпечної експлуатації обладнання, яка включає технічні (захист, автоматичне відключення, сенсори витоку газу), організаційні (інструктажі, медичне забезпечення, ЗІЗ) та програмні заходи (АСУ, дистанційне керування). У частині екологічного контролю визначено, що застосування ВДЕ дозволяє повністю відмовитися від спалювання викопного палива, скоротити викиди CO₂ на 90–95% та переробляти органічні залишки у добрива.

Таким чином, реалізація даного проєкту забезпечує:

- високий рівень енергетичної незалежності господарства,
- зниження експлуатаційних витрат,
- екологічну відповідність європейським стандартам,
- адаптивність до кліматичних змін та енергетичних криз.

Отримані результати мають як практичне значення для подальшого впровадження у сільському господарстві України, так і наукову новизну в частині інтеграції ВДЕ в аграрні системи. Розроблена модель може бути масштабована для інших регіонів, особливо у випадках, коли потрібно відновити зруйновану інфраструктуру або створити енергонезалежні аграрні комплекси в постконфліктних зонах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/555-15>
2. ДБН В.2.5-56:2014 «Системи сонячного теплопостачання. Проектування та монтаж».
3. ДСТУ ISO 14001:2015 «Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування».
4. ДСТУ EN ISO 12100:2014 «Безпека машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризику та зниження ризику».
5. ДСТУ EN 50110-1:2014 «Експлуатація електроустановок».
6. ДСТУ EN 60204-1:2015 «Безпека машин. Електрообладнання машин».
7. ДСТУ IEC 60529:2014 «Ступені захисту оболонками (Код IP)».
8. ДСТУ ISO 3864-1:2016 «Графічні символи. Кольори та знаки безпеки».
9. Renewable Energy in Greenhouse Horticulture: A Review — Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews>
10. European Commission. Renewable Energy Progress Report. Brussels, 2020.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52020DC0952>
11. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Energy for Agriculture, 2019. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf
12. Netherlands Enterprise Agency. Energy-efficient Greenhouses: Technologies and Practices, 2020. URL: <https://english.rvo.nl/sites/default/files/2023-08/English%20brochure%20SDE%20B%202022%20-%20juli%202022.pdf>
13. International Energy Agency (IEA). Solar Energy Perspectives. Paris, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>

14. Canadian Solar Energy Association. Solar Technologies for Greenhouse Farming, 2020. URL: https://renewablesassociation.ca/wp-content/uploads/2021/11/CanREAs2050Vision_Nov2021_web.pdf
15. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (Japan). Smart Greenhouse Initiatives, 2022. URL: https://www.maff.go.jp/e/policies/tech_res/smaagri/attach/pdf/Promotion_of_Smart_Agriculture.pdf
16. Icelandic Renewable Energy Cluster. Geothermal in Agriculture, 2020. URL: https://www.academia.edu/111466407/Profile_of_the_Icelandic_Geothermal_Cluster?uc-sb-sw=11539889
17. Israel Ministry of Agriculture. Water-Energy Nexus in Israeli Greenhouses, 2019. URL: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/366943735/1-s2.0-S0308521X24001902-main.pdf>
18. International Energy Agency Bioenergy. Biogas and Biomethane in Agriculture, 2021. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b757571-c8d0-464f-baad-bc30ec5ff46e/OutlookforBiogasandBiomethane.pdf>
18. European Biogas Association. Market Report 2023. URL: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>
19. Clean Energy Council (Australia). Clean Energy Australia Report, 2022. URL: <https://cleanenergycouncil.org.au/cec/media/background/resources/clean-energy-australia-report-2022.pdf>
20. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Renewable Energy Status and Trends, 2021. URL: https://unece.org/sites/default/files/2022-09/REN21_UNECE2022_FullReport_red.pdf
21. German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. Renewable Energy in Germany, 2020. URL:

- https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/renewable-energy-sources-in-figures-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4
22. National Renewable Energy Laboratory (USA). Best Practices for Integrating PV in Agriculture, 2021. URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/77635.pdf>
 23. AgriVoltaics International Conference Proceedings, 2022. URL: <https://www.tib-op.org/ojs/index.php/agripv/issue/view/7>
 24. Sustainable Energy Authority of Ireland. Solar Thermal in Agriculture, 2020. URL: <https://www.seai.ie/sites/default/files/publications/2020-Renewable-Energy-in-Ireland-Report.pdf>
 25. International Finance Corporation (IFC). Investing in Renewable Energy for Agribusiness, 2019. URL: <https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/mgrt/storiesofimpact-agribusiness-final-10res.pdf>
 26. European Environment Agency (EEA). Climate Mitigation in Agriculture, 2021. URL: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cme/products/etc-cme-reports/etc-cme-report-6-2021-agriculture_pams_analysis_20220510.pdf
 27. Бабич В.Л., Ільченко С.М. Енергозбереження в тепличному господарстві: монографія. — К.: НАУ, 2019.
 28. Буряков О.В., Козаченко О.О. Перспективи впровадження поновлюваних джерел енергії в аграрному секторі України // Вісник аграрної науки. — 2021. — № 4. — С. 38–45.
 29. Шапаренко О.А., Гордієнко М.І. Сучасні системи енергозабезпечення тепличних комплексів з використанням ПДЕ // Енергетика: економіка, технології, екологія. — 2020. — № 2(64). — С. 22–30.
 30. Левченко В.І. Аналіз кліматичних факторів при виборі типу енергоефективної теплиці в умовах України // Техніка, енергетика, транспорт АПК. — 2022. — № 3. — С. 17–25.

31. Національна академія аграрних наук України. Стратегія сталого розвитку аграрної енергетики України на період до 2030 року. — К.: НААН, 2020.
32. Гуменюк В.В., Ігнатенко І.Ю. Розвиток відновлюваної енергетики в сільському господарстві України: технічні та економічні аспекти // Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія: Екологія. — 2021. — № 25. — С. 72–81.
33. Храбан Г.І., Савченко Ю.О. Потенціал біоенергетики в агропромисловому секторі України // Агроінженерія. — 2022. — № 4. — С. 11–18.
34. Ревенко І.О. Вдосконалення систем управління тепловими процесами в теплицях з урахуванням сучасних енергетичних технологій // Енергетика та автоматика. — 2020. — № 3(51). — С. 45–53.
35. Кальченко С.В., Орлик С.В. Моделювання енергоспоживання тепличного комплексу з урахуванням ПДЕ // Технічні науки та технології. — 2021. — № 1(23). — С. 60–68.

ДОДАТКИ

Додаток А. Таблиця середньомісячного енергетичного балансу теплиці на 2500 м² (таблиця включає середньодобову потребу в теплі й електриці, надходження енергії з ПДЕ, покриття джерелами, надлишки/дефіцит, роль накопичувачів

Таблиця дод. А

Середньомісячний енергетичний баланс теплиці

Місяць	Потр. тепла (МВт·год/добу)	Ген. тепла (МВт·год/добу)	Баланс тепла	Потр. ел. (кВт·год/добу)	Ген. ел. (кВт·год/добу)	Бала нс ел.	Джерела тепла	Джерела ел.
Січень	11.0	8.33	-2.67	250.0	770.0	520.0	Біогаз 80%, насос 10%, колектори 10%	Біогаз 60%, СФЕС 40%
Лютий	10.3	8.00	-2.33	240.0	636.0	396.0	Біогаз 75%, насос 15%, колектори 10%	Біогаз 55%, СФЕС 45%
Березень	8.33	6.00	-2.33	200.0	683.0	483.0	Біогаз 40%, насос 40%, колектори 20%	Біогаз 30%, СФЕС 70%
Квітень	6.00	5.00	-1.00	190.0	453.0	263.0	Насос 45%, колектори 55%	Біогаз 15%, СФЕС 85%
Травень	3.33	4.00	+0.67	183.0	383.0	200.0	Колектори 70%, насос 30%	Біогаз 10%, СФЕС 90%
Червень	2.00	2.33	+0.33	180.0	333.0	153.0	Колектори 80%, насос 20%	СФЕС 100%
Липень	1.67	2.00	+0.33	173.0	390.0	217.0	Колектори 80%, насос 20%	СФЕС 100%
Серпень	2.00	2.33	+0.33	177.0	357.0	180.0	Колектори 75%, насос 25%	СФЕС 100%
Вересень	4.00	3.67	-0.33	183.0	367.0	184.0	Колектори 50%, насос 50%	Біогаз 10%, СФЕС 90%
Жовтень	6.67	5.00	-1.67	210.0	417.0	207.0	Біогаз 60%, насос 25%, колектори 15%	Біогаз 35%, СФЕС 65%
Листопад	9.33	6.67	-2.67	227.0	510.0	283.0	Біогаз 70%, насос 20%, колектори 10%	Біогаз 50%, СФЕС 50%
Грудень	10.67	7.67	-3.00	247.0	580.0	333.0	Біогаз 80%, насос 15%, колектори 5%	Біогаз 55%, СФЕС 45%