

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
УМОВ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН У ГІДРОПОНЦІ ПРИ БЛЕКАУТЬ»

Виконав: студент VI курсу групи Аін-62

Спеціальності 208 «Агроінженерія»
(шифр і назва)

Роман Дуневич
(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н. Олександр Левчук
(Ім'я та прізвище)

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ
ІМЕНІ ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА

Освітній Ступінь «Магістр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

к.т.н., доцент Шарибура А.О.
“ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

ДУНЕВИЧУ РОМАНУ РОМАНОВИЧУ

1. Тема роботи: «Розроблення систем збереження технологічних умов вирощування рослин у гідропоніці при блекауті»

Керівник роботи: Левчук Олександр Васильович, к.т.н

Затверджена наказом по університету №140/к-с від 28.02.2025 року

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 10.12.2025 року

3. Вихідні дані до роботи: 1) особливості роботи теплиць з гідропонним вирощуванням рослин; 2) способи і засоби автономного енергозабезпечення; 3) методи математичної статистики; 4) стандарти прикладної статистики.

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

4.1. Аналіз стану питання та технічних умов

4.2. Сучасні рішення для збереження оптимальних умов вирощування рослин при блекауті

4.3. Методика експериментальних досліджень

4.4. Опрацювання результатів досліджень

4.5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного ілюстраційного матеріалу:

Графічна частина до кваліфікаційної роботи оформляється у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 4	<i>Левчук О.В., к.т.н., в.о. доцента кафедри агроінженерії та технічного сервісу ім. проф. О. Семковича</i>			
5	<i>Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва</i>			

7. Дата видачі завдання «28» лютого 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	<i>Аналіз стану питання та технічних умов</i>	<i>28.02.25-25.04.25</i>	
2	<i>Сучасні рішення для збереження оптимальних умов вирощування рослин при блекауті</i>	<i>28.04.25-27.06.25</i>	
3	<i>Методика експериментальних досліджень</i>	<i>30.06.25-29.08.25</i>	
4	<i>Опрацювання результатів досліджень</i>	<i>01.09.25-26.09.25</i>	
5	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>29.09.25-31.10.25</i>	
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>03.11.24-10.12.25</i>	

Студент _____ Роман Дуневич
(підпис)

Керівник роботи _____ Олександр Левчук
(підпис)

УДК: 658.51:631.3

Магістерська робота: 74с. текст. част., 19 рис., 11 табл., 16 слайдів., 43 джерела.

Розроблення систем збереження технологічних умов вирощування рослин у гідропоніці при блекауті

Дуневич Р.Р. Кафедра агроінженерії та технічного сервісу ім. О.Семковича. – Дубляни, Львівський НУВМБ ім. С.З.Гжицького, 2025.

В даній дипломній роботі розглянуто питання впливу факторів, що впливають на енергозабезпечення гідропонних агропідприємств при блекауті .

Здійснено теоретичні дослідження та опрацьовано їх результати. На підставі них встановлено можливості дублювання енергозабезпечення гідропонічних теплиць.

Також у дипломній роботі розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: гідропоніка, способи енергозабезпечення, електричний акумулятор, тепловий насос

ЗМІСТ

Вступ.....	6
Розділ 1 Аналіз стану питання та технічних умов.....	10
1.1 Особливості гідропоніки як технології безгрунтового вирощування рослин.....	10
1.2 Вплив стабільності енергопостачання на функціонування гідропонних систем.....	11
1.3 Огляд існуючих технологій збереження теплової та електричної енергії.....	12
1.4 Перелік основних технічних проблем функціонування гідропоніки при блекауті.....	14
Розділ 2 Сучасні рішення для збереження оптимальних умов вирощування рослин при блекауті	20
2.1 Основні вимоги до систем автономного забезпечення технологічних умов гідропонного вирощування рослин.....	20
2.2 Використання натрій-іонного акумулятора як джерела безперебійного живлення.....	23
2.3 Система акумуляції теплової енергії на основі натрій-ацетату.....	30
2.4 Застосування теплових насосів для підтримання мікроклімату.....	34
Розділ 3 Методика експериментальних досліджень.....	37
Розділ 4 Опрацювання результатів досліджень.....	54
Розділ 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	61
Список використаних джерел.....	71

ВСТУП

Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва та зростання популярності міського вертикального вирощування рослин призвели до масового впровадження високотехнологічних гідропонних систем. Ці закриті агроєкосистеми забезпечують точний контроль над усіма параметрами життєзабезпечення рослин – від мінерального харчування до мікроклімату. Типові сучасні установки включають: насосні модулі (0,5–1,2 МПа, споживання 50–150 Вт), аераційні компресори (5–15 л/хв), LED освітлення (PPFD 200–800 мкмоль/м²•с, потужність 100–600 Вт/м²), а також системи обігріву та вентиляції, сумарне енергоспоживання яких сягає 2–4 кВт•год на кожен 1 м² площі вирощування на добу. Ці закриті агроєкосистеми забезпечують точний контроль над усіма параметрами життєзабезпечення рослин – рН (5,4–6,6), електропровідністю (ЕС 1,2–2,4 мСм/см), температурою розчину (18–24°C) та рівнем CO₂ (800–1200 ppm). Однак, їхня основна перевага – незалежність від зовнішніх кліматичних умов – обертається критичною вразливістю: абсолютною залежністю від стабільного електропостачання. Явище тривалого блекауту (від 4 годин) стає екзистенційною загрозою для технологічних культур, що вирощуються за таким методом, і система втрачає стабільність:

- Насоси та аератори зупиняються, рівень розчиненого кисню падає нижче 2 мг/л, і вже через 2–3 години коренева система рослин переходить у стан гіпоксії.
- Освітлення припиняє роботу, що порушує фотоперіод та синтез АТФ у листках; при відсутності світла понад 12 годин у швидкорослих культур (наприклад, салату або базиліку) спостерігається зниження темпів росту до 40–60%.
- Системи вентиляції та охолодження зупиняються, і температура в камерах може підвищуватися до 35–40°C, що викликає тепловий стрес і прискорене випаровування вологи з коренів.

- Без циркуляції розчину починають розвиватися анаеробні патогени (*Pythium*, *Fusarium oxysporum*), що здатні повністю зруйнувати кореневу систему за 6–12 годин.

Для запобігання цим ризикам розробляють резервні енергосистеми на основі:

- гелевих або літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторів із ємністю 2–5 кВт•год, які можуть підтримувати роботу критичних вузлів (насос, контролер, аерація) протягом 8–12 годин;
- сонячних фотоелектричних модулів потужністю 1–2 кВт із гібридними інверторами;
- Дизельні електрогенератори великої потужності.

Окрему роль відіграють автоматизовані системи енергоменеджменту, які розподіляють навантаження, переводячи неважливі вузли (освітлення, підігрів) у режим очікування. Такі контролери базуються на мікропроцесорах ESP32 або STM32, здатних відслідковувати параметри енергоспоживання в реальному часі та оптимізувати роботу до 30% ефективніше, ніж звичайні реле.

Попри високу технологічну складність, гідропоніка є економічно вигідною та екологічно доцільною технологією, що дозволяє отримувати високі врожаї з мінімальними витратами ресурсів. Тому впровадження нових технічних систем автоматизації, енергозбереження, та моніторингу параметрів мікроклімату є одним із найважливіших напрямів подальшого вдосконалення аеропонного вирощування рослин. Враховуючи зростання частоти та тривалості енергетичних криз робить питання енергонезалежності гідропонних систем ключовим чинником їхньої життєздатності. Тому для забезпечення стабільного функціонування в умовах блекаута необхідно комплексно поєднувати електричні, теплові та хімічні джерела резервного живлення.

Мета роботи полягає у розробленні системи збереження технологічних умов вирощування рослин у гідропоніці при блекауті, отримання фізико-

математичної моделі системи, а також математичний розрахунок на прикладі гідропонічної теплиці із вирощування томатів при відсутньому забезпеченні централізованою електроенергією тривалістю 24 год.

Завдання дослідження:

- Вивчення існуючих технологій автономного забезпечення технологічних умов у гідропоніці.
- Аналіз впливу ключових факторів, при збереженні технологічних умов у теплиці.
- Створення фізико-математичної моделі теплового балансу і розрахунок основних параметрів отриманої моделі на прикладі теплиці площею 100 м².
- Обґрунтування використання теплової батареї на базі матриці із перенасиченого розчину ацетату натрію тригідрату і натрій іонного акумулятора електричної енергії.

Об'єкти дослідження – Модель теплиці із гідропонною системою вирощування рослин, у якій підтримуються технологічний процес. Модель роботи акумуляторів електричної і теплової енергії при виникненні блекаута.

Предмет дослідження — процеси забезпечення роботи гідропонічної системи та вплив основних технологічних параметрів при моделюванні ситуації із обмеженим використанням резервних джерел живлення та ефективність використання цих джерел залежно від погодних умов.

Методи дослідження. У проведеній роботі використані методи: Математичного моделювання теплових процесів; Чисельні методи розрахунку; Тривимірного параметричного аналізу; Аналіз чутливості системи; Порівняльний аналіз енергетичної ефективності; Екстраполяції даних з подібних досліджень; Аналізу exergy (ексергії) для оцінки ефективності перетворення енергії.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше отримано:

- Система аналізу синергетичного впливу теплофізичних та електроенергетичних параметрів на стабільність мікроклімату у гідропонічній теплиці.
- Теоретична верифікація ефективності комбінованого акумулювання теплової та електричної енергії при моделюванні умов блекауту.
- Математична модель оптимізації співвідношення між об'ємом ацетатного акумулятора, ємністю Na-Ion батареї та продуктивністю теплового насоса.
- Чисельне моделювання теплових потоків у системі "акумулюючий комплекс - тепловий насос - гідропонне приміщення".

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність становлять результати дослідження впливу усіх вибраних факторів автономної системи обігріву на підтримання технологічних умов у теплиці із гідропонічною системою вирощування томатів. Це дає змогу обґрунтовано вибрати і налаштувати резервну систему забезпечення теплом враховуючи погодні умови, об'єм теплиці, під час блекаута.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ТЕХНІЧНИХ УМОВ

1.1 Особливості гідропоніки як інноваційної технології та її енергетичний баланс.

Сучасна гідропоніка – це не просто заміна ґрунту на водний розчин; це складна біотехнічна система, де життєві процеси рослини повністю синхронізовані з роботою технічних засобів. Основними технологічними компонентами, що формують її енергоспоживання є:

- Система підготовки та циркуляції поживного розчину: Включає резервуар (100-2000 л), циркуляційний насос (потужністю 50-150 Вт, витратою 5-20 л/хв), систему дозування добрив та регуляції рН/ЕС. Найсучасніші системи використовують перистальтичні насоси-дозатори з точністю ± 0.1 мл/хв (наприклад, моделі серії Dulcometer D1c від ProMinent) та комбіновані рН/ЕС-контролери (Atlas Scientific рН Kit, точність ± 0.05).

- Система аерації. Є критично важливою для запобігання гіпоксії коренів. Потужність мембранних або поршневих компресорів (Hailea АСО-9602, Hiblow НР-80) складає 20-60 Вт, забезпечуючи тиск 0.02-0.05 МПа та витрату повітря 60-120 л/хв. Концентрація розчиненого кисню (DO) повинна підтримуватися на рівні не нижче 8 мг/л, що підтверджено дослідженнями [1]. Система освітлення. Найбільший споживач енергії (до 60-70% загального балансу). Сучасні LED-світильники (Philips GreenPower LED, Fluence Spyder) забезпечують фотосинтетичний потік фотонів (PPFD) 300-1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{с}$ при спектральному складі, оптимізованому для фотосинтезу (піки у синій 450 нм та червоній 660 нм областях). Питома потужність складає 200-600 Вт/м².

- Система клімат-контролю: Включає каналні вентилятори (100-300 Вт), теплові насоси або кондиціонери (1-3 кВт), системи зволоження/осушення та датчики температури, вологості (SHT-series від Sensirion) та CO₂ (SenseAir К30).

- Енергоспоживання типової гідропонної теплиці площею 50 м² може сягати 10-25 кВт•год, що робить її аналогічною за навантаженням до невеликого промислового цеху.



Рис. 1.1 Теплиця з застосуванням гідропонної системи вирощування рослин у кілька ярусів.

1.2 Вплив стабільності енергопостачання на фізіологію рослин та функціонування гідропонних систем.

Блекаут порушує гомеостаз системи на всіх рівнях. Дослідження, проведені на культурі салату (*Lactuca sativa*) в системі DWC (Deep Water Culture), показали [2]:

- Гіпоксія коренів: Відключення аерації за короткий період часу призводить до експоненційного падіння концентрації DO. Вже через 30 хвилин рівень DO може впасти з 8 мг/л до 3-4 мг/л – критичного порогу для більшості культур. Це викликає перехід на анаеробний метаболізм, накопичення токсичних сполук (етанол, молочна кислота) та загибель корневих волосків протягом 2-4 годин.

- Порушення фотоперіоду: відключення освітлення більш ніж на 15 хвилин для рослин з коротким світловим днем може спричинити стресову реакцію. Більш тривалі перебої (6+ годин) порушують циркадні ритми, пригнічують синтез хлорофілу та призводять до етіоляції (витягування) пагонів.

- Тепловий стрес: відмова вентиляції та охолодження призводить до швидкого накопичення тепла від залишкового тепловиділення електроніки, транспірації рослин та навколишнього середовища. Швидкість нагріву може досягати 1-2°C за хвилину. При температурі повітря понад 35°C у рослин

закриваються продиhi (стоми), припиняється транспірація та фотосинтез, відбувається денатурація білків [3].

- Стратифікація та зміна хімічного складу розчину. Зупинка циркуляційних насосів призводить до розшарування розчину за густиною, локального підвищення ЕС та "застою" навколо коренів, що посилює стресові умови.



Рисунок 1.2 – Система крапельного поливу

1.3 Огляд існуючих технологій збереження енергії та автономного енергозабезпечення і їхній потенціал для застосування в гідропоніці.

Сучасні гідропонні та аеропонні установки в містах потребують надійних резервних джерел енергії для роботи насосів, аераторів, LED-освітлення та систем клімат-контролю у разі блекауту. Нижче – короткий технічний огляд основних технологій з цифрами й практичними параметрами, релевантними для мікро- і мезо-ферм (площа $\approx 1\text{--}200\text{ м}^2$).

1) Літій-залізо-фосфатні батареї (LiFePO_4)

Переваги: висока циклічна довговічність, безпечніша хімія, помірна щільність електроенергії. Типові характеристики комерційних модулів:

- Енергетична щільність батареї: $\approx 0.08\text{--}0.11\text{ kWh/kg}$;
- Цикли корисної експлуатації до 3000–5000 циклів при 80% DoD;
- ККД заряд/розряд досягає 90–96%;

Практичний приклад: батарея 5 kWh (корисна $\approx 4\text{ kWh}$ при 80% DoD) забезпечить базовий набір (насос 100 W + контролер 20 W + аератор 30 W = 150 W) ≈ 26 год автономної роботи; якщо додати освітлення 300 W – час

знижується до ≈ 11 год. LiFePO_4 – стандартний вибір для малих і середніх вертикальних ферм через співвідношення ціна/життєвий ресурс.

2) Розчинно-фазні (redox) акумулятори (Flow-batteries)

Переваги: масштабована ємність (енергія \rightarrow електроліти в резервуарах), довгий ресурс циклів (десятки тисяч циклів), швидке розширення ємності.

Типові параметри:

- Потужність модулів: (1–100 kW);
- Енергетична щільність батареї 0.02–0.05 kWh/kg (20–50 Wh/kg);
- Цикли корисної експлуатації 10 000 циклів при 80% DoD (для ванадієвих систем, де деградація електродів мінімальна).
- ККД заряд/розряд: 65–85%, залежно від типу системи (ванадієва ближче до 80–85%, цинк-бромна – ближче до 70%);
- робоча температура є в межах 10–40°C, висока стійкість до глибокого розряду.

Підходить для тепличних комплексів, де потрібен великий час автономії (кілька десятків годин) і часто – тривале зберігання енергії без деградації.

3) Сонячні PV + інвертор + система управління (Solar-plus-storage)

Сонячні модулі (250–450 Wp/шт) у поєднанні з батареями забезпечують часткову енергетичну незалежність. NREL-дослідження показують, що оптимальне поєднання PV + батарей з правильною конфігурацією інвертора і EMS знижує втрати «clipping» і підвищує самоспоживання. Для малих теплиць корисна потужність PV 1–5 kWp + 5–20 kWh батарей забезпечує суттєву стійкість до коротких (4–12 год) блекаутів.

Із цього можна зробити висновок, що кожна окрема технологія не є універсальною: для гарантування безперебійної роботи гідропоніки оптимальна архітектура – гібридний підхід (LiFePO_4 для швидкого резерву, flow-batteries або водень для тривалого зберігання, SAT для теплової інерції плюс PV і інтелектуальний енергоменеджмент. Але, враховуючи значну вартість акумуляторів цього типу, розроблення інших гібридних систем є актуальним. Проаналізувавши дослідження () було вибрано комплексну систему на основі

поєднання теплових акумуляторів (де використовується фазовий перехід) У нашому випадку – на основі натрій-ацетату (SAT), Натрій-іонної (Na-ion) батареї та теплового насосу. Таке поєднання дає баланс грошових витрат, ефективності та надійності для захисту врожаю на період блекаута.

1.4 Перелік основних технічних проблем функціонування гідропоніки при блекауті.

Функціонування гідропонних систем критично залежить від безперервного забезпечення електроенергією і теплом. Під час тривалих блекаутів (6–72 год і більше) порушуються ключові технологічні параметри вирощування. Безпосередній вплив низьких температур, відсутня своєчасна рециркуляція поживного розчину, відсутність освітлення мають надзвичайно вагомий вплив на стабільність мікроклімату у теплиці й підтриманні життєздатності рослин. Нижче наведено основні технічні проблеми, що виникають при припиненні електроживлення, з прикладами та кількісною оцінкою.

- Втрата можливості циркуляції живильного розчину.

У гідропонних системах насосна складова повинна працювати безперервно або циклічно з високою частотою (кожні 10–20 хв). При блекауті виникають такі критичні проблеми: Зупинка циркуляції веде до гіпоксії коренів. Корінь рослини споживає до 2–4 мг O_2 /л розчину за годину [1]. Уже через 30–60 хв без аерації починає різко знижуватися доступність кисню. У системах NFT та капельного поливу корінь швидко підсихає. Наприклад, салат латук при температурі 24–26°C втрачає тургор уже через 20–40 хв зупинки подачі розчину.

- Різке зниження температури у вирощувальній камері.

Температура – ключовий фактор життєдіяльності рослин. При блекауті: Всередині приміщення гідропоніки температура падає в середньому на 1.5–3°C за годину при зовнішній температурі 0...–5°C [2]. Багато культур мають критичні нижні пороги: салат: +8°C мінімум, базилік: +12°C мінімум, огірок: +10°C мінімум. При досягненні цих порогів протягом 3–5 годин припиняється

нормальний ріст, а при падінні температури на 10°C нижче порогу – можливе відмирання. Найбільш уразливі – теплиці-контейнери, через малу інертність тепла та високе співвідношення площі стін до об'єму, а також теплиці у яких система опалення залежить виключно від електроенергії.

- Зупинка вентиляції та деградація газового складу повітря.

Без вентиляції за 1–2 години у замкненій камері відбуваються критичні зміни: Приріст CO_2 від дихання рослин + персоналу: до 30–70 ppm за годину. Через 6 год рівень CO_2 може зрости до 2500 ppm, що призводить до пригнічення фотосинтезу [3]. Вологість підвищується до 90–95%, що стимулює розвиток грибкових патогенів. Відсутність циркуляції повітря створює «кишені» холодного чи теплого повітря–температурний градієнт до $5\text{--}8^{\circ}\text{C}$.

- Відмова освітлення та порушення фотоперіоду

Освітлення на основі світло діодів потрібного спектру – один із найбільш енергоспоживаючих елементів гідропоніки (до 40–50% споживання). При блекауті рослини втрачають фотосинтез повністю. Критичні культури (салат, зелень) погано переносять порушення фотоперіоду довше ніж 6–8 год. Для плодоносних культур (перець, томат) збій у циклі більше ніж 12 год веде до порушення біоенергетичної регуляції, скидання зав'язі та затримки росту. Наприклад, у томату зниження PAR до нуля на 24 год зменшує добову продуктивність фотосинтезу на до 40%.

- Відмова контролерів та систем автоматизації

Зупинка живлення вимикає: сенсорні модулі (рН, ЕС, температура); PLC-контролери, таймери, реле; систему аварійних сповіщень. Це призводить до відсутності корекції рН та електропровідності протягом тривалого часу; ризику перенасичення або виснаження живильного розчину; можливих стрибків температури води до $\pm 3\text{--}5^{\circ}\text{C}$, що впливає на розчинність кисню.

- Втрата роботи теплових насосів і систем рекуперації

Якщо теплиця використовує тепловий насос: його COP = 2.5–4.5, тобто на кожен 1 кВт електроенергії він дає 2.5–4.5 кВт тепла. при блекауті втрачається ефективне теплопостачання, і тепло падає до рівня пасивної

теплоємності конструкції. У контейнерних фермах без опалення температура може опуститися з $+20^{\circ}\text{C}$ до $+5^{\circ}\text{C}$ за 4–7 год при -5°C зовні.

- Втрата даних моніторингу та ризик невиявлених відхилень

Через відсутність живлення: не зберігаються лог-файли роботи обладнання, не відбувається передача даних на сервер, немає сповіщення персоналу про критичні помилки у системі. Це ускладнює подальший аналіз і діагностику обладнання.

- Охолодження або перегрів живильного розчину

Температура розчину критична (оптимум $18\text{--}22^{\circ}\text{C}$). Так при $<14^{\circ}\text{C}$ – уповільнення всмоктування іонів; При блекауті розчин охолоджується до температури приміщення за: 1–3 год для резервуару 50–100 л, 3–5 год для резервуару 200–300 л.

1.5 Висновки до розділу 1.

Проведений аналіз стану питання дозволяє сформулювати комплексне розуміння проблематики функціонування гідропонних систем в умовах нестабільного енергопостачання та визначити критичні напрямки для розроблення систем збереження технологічних умов вирощування рослин при блекауті. Гідропоніка як технологія безґрунтового вирощування рослин демонструє значні переваги порівняно з традиційним ґрунтовим землеробством, забезпечуючи підвищення врожайності на 25-30% та скорочення споживання води до 90%.

До основних гідропонних технологій належать техніки: поживного шару (NFT), систему глибоководних культур (DWC), крапельне зрошення та аеропоніку, характеризуються різним ступенем енергозалежності. Системи NFT потребують безперервної чи циклічної циркуляції поживного розчину зі швидкістю 1-2 літри на хвилину, що досягається насосами потужністю 40-100 Вт залежно від масштабу установки. Аеропонні системи вимагають ще більшої енергії для розпилення розчину через форсунки високого тиску, споживаючи 150-300 Вт на кожні 10 квадратних метрів вирощувальної площі. Критичним аспектом є підтримання мікроклімату та живлення рослин. Температура

поживного розчину повинна утримуватись у діапазоні 18-22°C для більшості культур, оскільки підвищення до 26°C призводить до зниження розчиненого кисню з 8,4 мг/л до 6,5 мг/л, що негативно впливає на кореневу систему. Концентрація розчиненого кисню має становити не менше 5-6 мг/л для забезпечення нормального дихання коренів. Показник рН розчину підтримується в межах 5,5-6,5 одиниць, а електропровідність (ЕС) варіює від 1,5 до 3,0 мСм/см залежно від стадії розвитку рослин та виду культури. Відхилення цих параметрів від оптимальних значень більше ніж на 10-15% протягом 4-6 годин призводить до стресу рослин та зниження продуктивності на 15-20%.

Аналіз впливу основних факторів виявив критичну залежність гідропонних систем від безперебійної подачі електроенергії. Повна відсутність живлення протягом 2-3 годин може призвести до загибелі коренів у системах NFT через пересихання, тоді як у DWC-системах критичний період становить 6-8 годин за рахунок наявності водного резервуару. Особливо вразливими є системи штучного освітлення, які споживають 100-200 Вт/м² при використанні LED-світильників та забезпечують фотосинтетичну активну радіацію (ФАР) на рівні 400-600 мкмоль/м²с. Переривання світлового режиму більше ніж на 4 години в активній фазі може призвести до порушення фотосинтезу та затримки розвитку рослин на 3-5 днів. Насоси циркуляції та аерації можуть споживати 100-300 Вт на типову систему площею 50-100 м², працюючи в циклічному або безперервному режимі.

Огляд існуючих технологій збереження енергії показав наявність декількох перспективних напрямків. Акумуляторні батареї на основі літій-іонних технологій забезпечують щільність енергії 150-250 Вт·год/кг та ефективність циклу заряд-розряд 90-95%, однак їх вартість становить 400-600 доларів США за кВт·год ємності. Свинцево-кислотні акумулятори мають меншу вартість (150-200 доларів за кВт·год), але нижчу щільність енергії (30-50 Вт·год/кг) та обмежену кількість циклів (300-500 проти 2000-5000 у літій-іонних). Системи безперебійного живлення (ДБЖ) промислового класу здатні

забезпечити автономну роботу протягом 2-8 годин залежно від ємності батарей та навантаження. Теплові акумулятори на основі води можуть зберігати 4,18 кДж енергії на кожен кілограм при нагріванні на 1°C, що робить їх ефективним рішенням для буферизації теплової енергії. Резервуар об'ємом 1000 літрів з температурним діапазоном 40-80°C акумулює приблизно 46,5 кВт·год теплової енергії. Матеріали з фазовим переходом (PCM) на основі перенасичених розчинів деяких солей з температурою плавлення 18-60°C мають питому теплоту плавлення 150-250 кДж/кг, забезпечуючи компактне зберігання теплової енергії для стабілізації температури поживного розчину. Також до технологій резервного забезпечення електроенергією можна віднести Сонячні панелі. Для типової гідропонної системи площею 100 м² з добовим споживанням 15-25 кВт·год необхідна сонячна електростанція потужністю 5-8 кВт з відповідною системою акумулювання енергії ємністю 20-30 кВт·год для забезпечення автономності протягом доби. Хоча ефективне використання сонячної енергетики залежить від погодних умов і розташуванні сонячних панелей.

Технічні проблеми функціонування гідропоніки при блекауті включають зниження концентрації розчиненого кисню (на 0,3-0,5 мг/л за годину без аерації), припинення циркуляції розчину в NFT-системах з ризиком пересихання коренів протягом 1-2 годин, повну відсутність освітлення при використанні штучних джерел світла, порушення мікроклімату через зупинку вентиляції, неможливість моніторингу та автоматичного регулювання параметрів системи. Пріоритетними напрямками розроблення систем збереження умов вирощування є створення гібридних систем енергозабезпечення з поєднанням відновлювальних джерел енергії, ємнісних акумуляторів та впровадження пасивних методів термостабілізації поживного розчину з використанням фазо перехідних матеріалів, розроблення енергоефективних систем аерації з низьким споживанням енергії та оптимізація світлового режиму з використанням природного освітлення та енергоефективних LED-технологій з можливістю роботи від резервних джерел

живлення. Отже, гідропоніка технологічно вразлива. Навіть короткочасні блекнути можуть викликати критичні порушення. Дослідження автономності, моделювання розподілу енергії та впровадження комбінованих акумуляторів є стратегічно необхідними для створення стійких систем. Тривалі відключення – понад 4–6 годин – створюють реальні ризики втрати врожаю, а відсутність аварійних систем резервування робить систему вразливою до комплексного каскадного відмовлення.

2. СУЧАСНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН ПРИ БЛЕКАУТІ

2.1 Основні вимоги до систем автономного забезпечення технологічних умов гідропонного вирощування рослин.

Система автономного гідропонного вирощування повинна забезпечувати повний автоматичний контроль і підтримку параметрів середовища, необхідних для стабільного росту рослин без постійного втручання оператора у випадку відключення центрального електроживлення. Основні вимоги формуються за трьома напрямками: контроль, керування та енергозабезпечення. Система має своєчасно виявляти будь-які відхилення технологічних параметрів, коригувати їх у режимі реального часу та утримувати мікроклімат у визначених межах незалежно від зовнішніх умов. Для цього необхідні надійні алгоритми моніторингу, здатні працювати навіть у режимі обмеженого живлення, а також резервні модулі керування, які забезпечують роботу насосів, датчиків і теплових систем у пріоритетному режимі. Зокрема, система повинна підтримувати температуру поживного розчину в межах 18–22 °С, відносну вологість повітря – 60–80 %, рівень рН – 5,5–6,5, а електропровідність (ЕС) – 1,2–2,5 мСм/см залежно від фази росту рослин. Періодичність відгуку датчиків має становити не більше 5–10 с, що забезпечує своєчасне реагування на критичні відхилення параметрів. У разі відключення зовнішнього електроживлення автономне енергозабезпечення повинно гарантувати безперервну роботу системи протягом щонайменше 12–24 год, з пріоритетним живленням насосів циркуляції, системи аерації та температурної стабілізації. Вимоги до системи контролю:

- Параметри моніторингу: Вимірювання рН, електропровідності (ЕС), температури живильного розчину, температури та вологості повітря, рівня розчину в баку, інтенсивності освітлення, а також (у закритих теплицях) концентрації CO₂.

- Типи датчиків: рН-електрод зі скляним чутливим елементом; ЕС-зонд із графітовими або платиновими електродами; термодатчики DS18B20 або

Pt100; ультразвуковий або поплавковий сенсор рівня; цифрові сенсори DHT22, SHT31 або BME280 для вологості/температури.

- Точність і калібрування: рН – не гірше ± 0.05 ; ЕС – ± 0.05 мСм/см; температура – ± 0.2 °С. Система повинна мати процедуру автоматичного або ручного калібрування датчиків.

- Оновлення даних: Із мінімальною частотою 1 раз на 5 секунд для параметрів розчину та 1 раз на 30 секунд для параметрів повітря.

1) Вимоги до системи керування: Мікроконтролер із низьким енергоспоживанням (ESP32, STM32, Arduino Mega, тощо) або промисловий ПЛК. Має забезпечувати достатню кількість аналогових виходів і входів для підключення усіх систем керування.

- Застосування вказаних наперед алгоритмів роботи включаючи роботу при обмеженому енергоспоживанні. Тобто, підтримка заданих меж для кожного параметра (PID-регулювання або гібридні алгоритми) навіть за умови живлення від резервного джерела живлення. Наприклад: при зниженні рН – дозування лугу, при підвищенні – кислоти; при падінні рівня живильного розчину – включення насоса доливу; при перевищенні температури – активація охолоджувача чи вентиляції.

- Всі пристрої мають бути сумісні з реле або електричними ключами 12–24 В (для безпеки). До них належить: усі насоси дозування (перистальтичні або мембранні), циркуляційні насоси, електромагнітні клапани, вентилятори, нагрівачі, LED-драйвери освітлення.

3) Вимоги до живлення та енергозбереження:

- Основне енергоживлення відбувається від мережі 220 В. Резервне від акумуляторної батареї. Також можливі комбінації із сонячними панелями через контролер заряду, тепловими батареями.

- Надійні системи захисту. Автоматичні запобіжники, захист від короткого замикання, перегріву електричних систем, тощо.

- Висока енергоефективність. Використання LED-освітлення з КПД > 160 лм/Вт, енергоощадних насосів (споживання ≤ 30 Вт на 50 л об'єму).

4) Вимоги до надійності та обслуговування:

- Хімічно стійкі матеріали. Усі елементи, що контактують із розчином, повинні бути хімічно інертними (ПВХ, поліпропілен, тефлон, нержавіюча сталь AISI 316, тощо).

- Обслуговування. Можливість зняття баків і трубок для промивання, легкий доступ до насосів і датчиків, форсунок та інших елементів, що потребують постійного обслуговування.

- Діагностика. Система має фіксувати збої (обрив датчика, відсутність подачі, перегрів) та виводити повідомлення про несправність.

Також при проектуванні систем гідропонного вирощування рослин, враховуючи можливість роботи від резервних джерел живлення під час блекауту слід враховувати наступні вимоги і принципи:

- Модульність: Можливість масштабування системи шляхом додавання акумуляторних блоків або теплових акумуляторів.

- Масштабованість: Архітектура повинна дозволяти легко збільшувати потужність та ємність.

- Автономність та надійність: Час перемикавання на резерв не повинен перевищувати 10-20 мс. Апаратне забезпечення повинно мати високий ступінь захисту (IP65 для сенсорів у вологому середовищі).

- Енергоефективність: Використання обладнання з високим ККД (інвертори з ККД >94%, BLDC-двигуни для вентиляторів).

Беручи до уваги те, що можливості резервних джерел енергії є надзвичайно обмежені по тривалості роботи і потужності для найефективнішого їх використання слід використовувати наступну схему пріоритетів:

- Пріоритет 1 (Критичні системи). Контролер, аераційний компресор, циркуляційний насос. Сумарна потужність: ~150 Вт. Автономність: 24+ години.

- Пріоритет 2 (Важливі). Частина LED-освітлення (50-100 Вт для мінімального підсвічування), циркуляційні вентилятори. Автономність: 8-12 годин.

- Пріоритет 3 (Допоміжні): Повне освітлення, теплові насоси, системи зволоження. Автономність: 0-4 години (в залежності від ємності АКБ)

2.2 Використання натрій-іонного акумулятора як джерела безперебійного живлення.

Натрій-іонні акумулятори (Na-ion) представляють собою перспективну альтернативу дуже поширеним літій-іонним батареям для створення систем безперебійного живлення (ДБЖ) у гідропонних установках. Ця технологія поєднує економічну доступність, екологічність та унікальні експлуатаційні характеристики, що робить її особливо привабливою для аграрного сектору. Натрій та літій належать до однієї групи періодичної таблиці елементів, тому мають подібні хімічні властивості. Проте іони натрію мають більший розмір, що вимагає використання спеціальних електродних матеріалів. Типовий натрій-іонний акумулятор видає напругу 3,6 В та має ємність від 115 А•год/кг, що робить його придатним для використання у стаціонарних системах зберігання енергії. Натрій-іонний акумулятор працює за принципом, подібним до літій-іонного, але замість іонів літію використовує іони натрію (Na^+) як носії заряду. Під час зарядження іони натрію переміщуються від позитивного електрода (катода) через електроліт до негативного електрода (анода), де накопичуються. При розрядженні процес відбувається у зворотному напрямку, створюючи електричний струм.

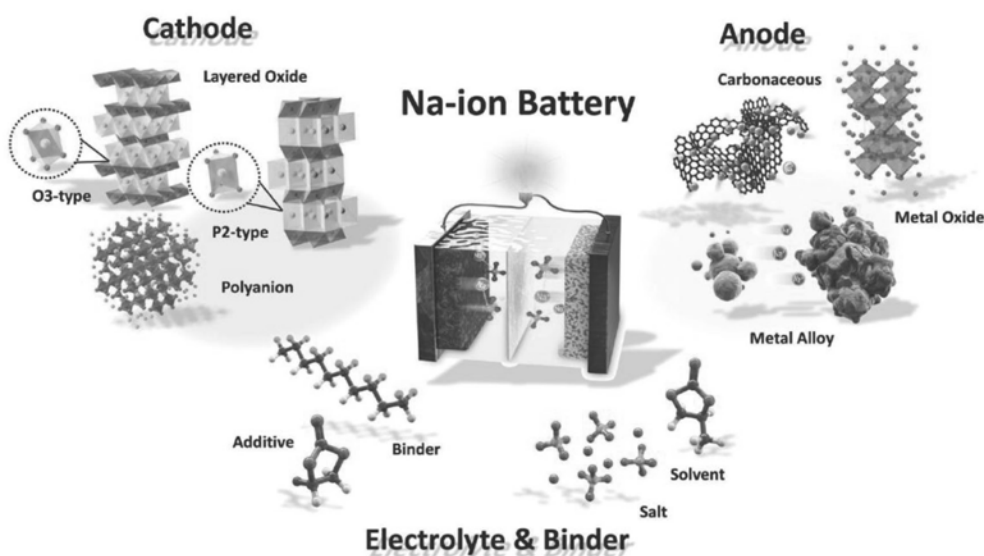


Рис. 2.1 Принцип роботи натрій іонного акумулятора.

- Технологія натрій-іонних акумуляторів.

Сучасні натрій-іонні акумулятори використовують різні типи катодних матеріалів: берлінська лазур – доступний і дешевий матеріал; Поліаніонні сполуки – забезпечують стабільність циклування; шаруваті оксиди – пропонують високу енергетичну щільність. Для анодів найчастіше застосовується твердий вуглець (hard carbon), який має неупорядковану кристалічну структуру та короткі шляхи дифузії іонів натрію. Це забезпечує швидке накопичення іонів та чудову роботу за низьких температур. Важливою перевагою є можливість використання алюмінію замість міді для анодного струмознімача, що суттєво знижує вартість виробництва та зменшує ризики у ланцюжку постачання.



Рис.2.2 Комплекс Energy Storage Station із натрій-іонних батарей у
Baoshi (провінція Юньнань), Китай.

- Переваги натрій-іонних акумуляторів.

1) Економічна доступність. Натрій є одним із найпоширеніших елементів на Землі – його можна добувати навіть зі звичайної кухонної солі. Вартість натрію приблизно у 100 разів нижча за літій, що робить виробництво Na-ion акумуляторів значно дешевшим. За прогнозами експертів, при

масштабному виробництві натрій-іонні батареї можуть бути на 20-40% дешевшими за літій-залізо-фосфатні (LFP) акумулятори. Станом на 2025 рік окремі елементи форм-фактору 18650 (ємністю 1,3 А•год) коштують близько 72 грн, що еквівалентно приблизно \$1,80 за елемент. При масовому виробництві, яке компанія CATL планує розпочати наприкінці 2025 року, очікується подальше зниження цін.

2) Безпека експлуатації. Натрій-іонні акумулятори демонструють суттєво вищий рівень безпеки порівняно з літій-іонними. Вони мають набагато менший ризик теплового розгону – батареї не схильні до перегрівання та займання. До їх особливостей належить можливість повного розрядження, без пошкодження елемента, що спрощує транспортування та зберігання. Стабільний хімічний склад забезпечує мінімум побічних реакцій під час експлуатації а відсутність кобальту та нікелю – сприяють усуненню токсичних і небезпечних матеріалів. Як приклад, Компанія Natron Energy підкреслює, що натрій-іонні акумулятори їх виробництва є абсолютно безпечними та негорючими, що критично важливо для використання у закритих приміщеннях гідропонних ферм.

3) Виняткова морозостійкість. Одна з найважливіших характеристик натрій-іонних акумуляторів – їхня здатність працювати за надзвичайно низьких температур. Це пов'язано з кількома факторами: швидша десольватація іонів натрію – Na^+ мають слабку взаємодію з розчинником порівняно з Li^+ , що забезпечує ефективний транспорт іонів навіть на холоді; вища іонна провідність електроліту – натрієві акумулятори зберігають високу провідність за низьких температур та менший стоксів радіус – іони натрію мають кращу мобільність в електроліті. Так, друге покоління батарей CATL зберігає 93% ємності при $-30^{\circ}C$ та здатне нормально функціонувати при температурі до $-40^{\circ}C$.

4) Тривалість служби. Натрій-іонні акумулятори демонструють чудову циклічну стабільність: Сучасні комерційні елементи витримують 4,000-6,000 циклів заряд-розряд, як приклад компанія Natron Energy повідомляє про 50,000

циклів для своїх спеціалізованих батарей Батареї CATL другого покоління розраховані на понад 10,000 циклів, що значно перевищує показники багатьох літій-іонних акумуляторів масового сегмента (1,000-3,000 циклів).



Рис. 2.3 Резервний помисловий акумулятор фірми Natron Energy.

5) Екологічність. Видобуток та переробка натрію є набагато менш енергоємними процесами порівняно з літієм. Натрій не потребує складних технологій вилучення з рідкісних родовищ, не створює навантаження на водні ресурси (на відміну від літійових соляних озер Південної Америки) та не пов'язаний з техногенними проблемами видобутку кобальту в нестабільних регіонах.

- Приклади застосування.

Типова система ДБЖ на основі натрій-іонних акумуляторів для гідропоніки включає:

1. Інвертор/зарядний пристрій – перетворює постійний струм акумуляторів на змінний 220В.
2. Блок натрій-іонних акумуляторів – зазвичай з'єднаних послідовно для досягнення робочої напруги 24В або 48В.

3. Система управління батареями (BMS) – моніторинг напруги, температури, балансування елементів.
4. Автоматичний перемикач – для миттєвого переходу на резервне живлення.

Приклад розрахунку для домашньої установки:

Потужність навантаження: 250 Вт Бажаний час автономії: 12 годин Напруга системи: 24 В. Необхідна енергоємність = $250 \text{ Вт} \times 12 \text{ год} = 3,000 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ або 3 кВт·год. При нарузі 24 В необхідна ємність: $3,000 \text{ Вт}\cdot\text{год} / 24 \text{ В} = 125 \text{ А}\cdot\text{год}$ З урахуванням коефіцієнта безпеки (1,3) та втрат ефективності інвертора (0,9):

Реальна потрібна ємність = $125 \times 1,3 / 0,9 = \sim 180 \text{ А}\cdot\text{год}$

Вартість системи (орієнтовна):

- Блок натрій-іонних батарей (~\$1,764)
- ДБЖ-інвертор 1,500 Вт/24 В: 8,000-12,000 грн (~\$200-300)
- BMS та додаткове обладнання: 5,000-8,000 грн (~\$125-200)

Для порівняння, аналогічна система на літій-залізо-фосфатних акумуляторах коштуватиме на 20-30% дорожче – близько 105,000-120,000 грн.

Практичні приклади конфігурацій:

Домашня установка (2-3 м²):

- Потужність: 150-250 Вт
- Час автономії: 12-24 години
- Ємність батареї: 2-6 кВт·год
- Напруга системи: 24 В
- Вартість: 70,000-100,000 грн

Середня ферма (20-50 м²):

- Потужність: 1,500-3,000 Вт
- Час автономії: 8-12 годин
- Ємність батареї: 12-36 кВт·год
- Напруга системи: 48 В
- Вартість: 180,000-350,000 грн

- Застосування джерел безперебійного живлення у гідропоніці

1) Енергетичні потреби гідропонних систем

Штучне освітлення є одним із найбільших споживачів енергії в закритих гідропонних фермах. Сучасні LED-фітолампи споживають 16-25 Вт на одну лампу, при рекомендованій щільності 2,5 лампи на квадратний метр, що дає 40-62,5 Вт/м². Для невеликої домашньої установки площею 2-3 м² потужність освітлення становитиме:

- Мінімальна: $2 \text{ м}^2 \times 40 \text{ Вт/м}^2 = 80 \text{ Вт}$
- Максимальна: $3 \text{ м}^2 \times 62,5 \text{ Вт/м}^2 = 187,5 \text{ Вт}$

Традиційні натрієві лампи високого тиску (НЛВД) споживають значно більше – від 250 до 600 Вт на лампу, але сучасні LED-системи дозволяють економити до 90% енергії.

Водяні помпи для циркуляції живильного розчину зазвичай мають потужність від 15 до 100 Вт залежно від об'єму системи. Для домашньої установки типова потужність становить 25-40 Вт, а для професійних систем може сягати 200-300 Вт.

- Критичність безперервного живлення

На відміну від традиційного ґрунтового землеробства, гідропонні системи критично залежать від електроенергії. Навіть короткочасне відключення (2-4 години) може призвести до:

- Припинення аерації коренів – кисневе голодування рослин
- Зупинка циркуляції живильного розчину – нерівномірне постачання поживних речовин
- Порушення температурного режиму – перегрів або переохолодження системи
- Втрата врожаю – у критичних випадках загибель рослин протягом 6-12 годин

Тому система безперебійного живлення представляє собою обов'язковий компонент будь-якої серйозної гідропонної установки.

- Вимоги до ДБЖ для гідропоніки

Ідеальна система безперебійного живлення для гідропоніки повинна забезпечувати:

1. Достатню потужність – з запасом 20-30% від сумарного навантаження
2. Тривалу автономну роботу – мінімум 4-8 годин, оптимально 12-24 години
3. Правильну синусоїду – для коректної роботи насосів з електродвигунами
4. Швидке перемикання – максимум 4-10 мс для запобігання збоїв
5. Надійність та довговічність – мінімум 3,000-5,000 циклів
6. Роботу у широкому температурному діапазоні – особливо для неопалюваних теплиць

- Перспективи розвитку технології

Поточний стан ринку (2025 рік)

Натрій-іонна індустрія переживає період активної комерціалізації. Провідні світові виробники акумуляторів активно інвестують у виробничі потужності:

- CATL (Китай) – найбільший виробник батарей у світі планує розпочати масове виробництво батарей NaXtra наприкінці 2025 року з виходом на повну потужність до 2027 року
- BYD (Китай) – розпочав будівництво заводу вартістю \$1,4 млрд з потужністю 30 ГВт·год на рік для виробництва натрій-іонних батарей
- Northvolt (Швеція) – розробляє натрій-іонні батареї для стаціонарних систем зберігання енергії
- Faradion (Індія/Reliance Industries) – працює над комерціалізацією технології з планами досягнення гігаватного масштабу до 2025 року
- Natron Energy (США) – розпочала серійне виробництво довговічних натрій-іонних батарей
- Tiamat (Франція) – будує завод потужністю 5 ГВт·год з інвестиціями близько €150 млн

Аналітики Benchmark Mineral Intelligence прогнозують виробництво 335,4 ГВт·год натрій-іонних елементів до 2030 року, а ринковий потенціал оцінюється у \$18,9 млрд до 2032 року з річним зростанням 30,39%.

2.3 Система акумуляції теплової енергії на основі фазового перетворення натрій-ацетату тригідрату.

- Принцип дії та переваги.

Натрій-ацетат тригідрат ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, англ. Sodium Acetate Trihydrate, SAT) – це типовий матеріал з фазовим переходом (МФП), що використовується для акумуляції та виділення теплової енергії. Його робоча температура ($\approx 58^\circ\text{C}$) ідеально підходить для систем опалення приміщень та гарячого водопостачання (ГВП). При нагріванні вище 58°C кристалогідрат плавиться, поглинаючи велику кількість тепла (ентальпія плавлення). При охолодженні він має здатність до переохолодження – може залишатися в рідкому стані навіть за кімнатної температури якщо систему не порушити. Для ініціювання кристалізації та виділення накопиченого тепла достатньо активувати «тригер» – механічний удар, введення затравки або електричний імпульс. Це робить систему контрольованою та «само активованою».

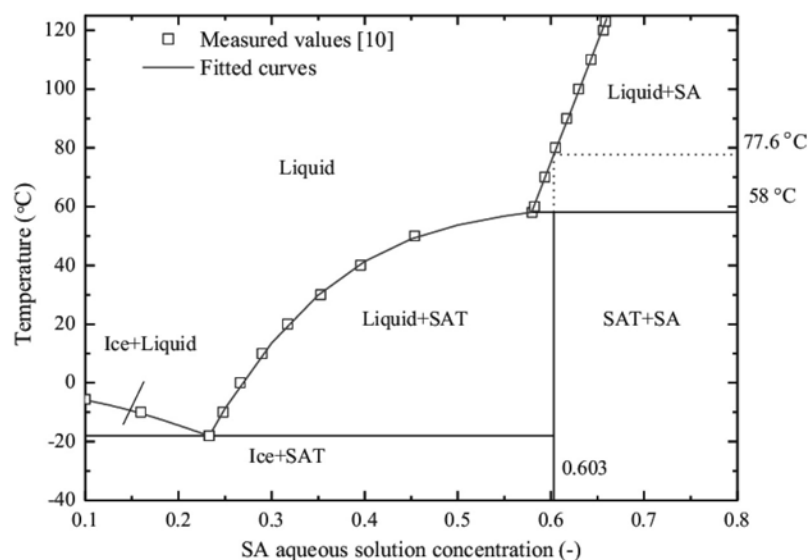


Рис. 2.4 Фазова діаграма розчину натрію ацетату (температура ↔ концентрація).

Основні характеристики Натрій-ацетату тригідрату:

- Висока енергетична щільність: $\approx 250-260$ кДж/кг (порівняйте з теплоємністю води: 4.18 кДж/кг \cdot °C для нагрівання на 1°C). Для запасу 1 ГДж тепла потрібно ~ 4 тонни СТТ, тоді як водяному баку-акумулятору для запасу тієї ж енергії (при $\Delta T=40^\circ\text{C}$) знадобиться ~ 6 тонн води.
- Питома теплоємність: тверда фаза: ~ 2.5 кДж/кг \cdot K. Рідка фаза: ~ 3.3 кДж/кг \cdot K.
- Ізотермічність: Тепло виділяється чи поглинається практично при постійній температурі (близько 58°C), що ідеально для ефективної роботи низькотемпературних систем опалення (теплі підлоги).
- Довготривалість: Стабільний матеріал, що витримує тисячі циклів плавлення-кристалізації.
- Безпека та доступність: Нетоксичний, невибухонебезпечний, відносно дешевий (побічний продукт хімічної промисловості).
- Температура фазового переходу (плавлення/кристалізації): 58 ± 2 °C.
- Прихована теплота плавлення (ентальпія): $260-265$ кДж/кг (або ≈ 160 кДж/л за рахунок щільності ~ 1.3 г/см³).
- Теплопровідність: $\sim 0.5-0.7$ Вт/м \cdot K (низька, тому для підвищення потужності системи часто використовують теплорозподільні ребра або присадки, що підвищують теплопровідність).
- Конструкція теплового акумулятора на основі СТТ (СТА):
- Корпус (теплообмінник): Герметичні пластини, трубчасті або панельні теплообмінники, зазвичай з нержавіючої сталі або іншого корозійностійкого матеріалу. Матеріал СТТ знаходиться в одному контурі, а теплоносій (вода, антифриз) – в іншому.
- Матриця для стабілізації: Для боротьби з розшаруванням матеріалу (відокремлення солі від води після багаторазових циклів) використовують загусники (гелі), пористі матриці (графіт, металеву піну) або механічне перемішування.

- Система ініціювання кристалізації: Надійний механізм запуску виділення тепла. Найчастіше – це герметичні картриджі з (кристалом СТТ), які вмикаються за командою контролера при потребі у теплі.
- Теплова ізоляція: Товстий шар (15-20 см) пінополіуретану або мінеральної вати для зведення втрат до мінімуму (0.5-1.0 °C/добу).



Рис. 2.5 Ацетату-натрію тригідрат (Натрій оцтовокислий 3-х водний) технічний у твердій фазі.

- Реальні приклади застосування

1. Системи з тепловим насосом «повітря-вода»: СТА дозволяє накопичувати дешеве тепло, вироблене тепловим насосом в період м'якої погоди або в нічний час, для покриття пікових навантажень в морози або вранці/вечорі. Це зменшує потужність (а отже, і вартість) теплового насоса та уникає його роботи в режимі нагрівання.
2. Сонячні теплові системи: накопичення надлишкового тепла від сонячних колекторів протягом дня для опалення та ГВП вночі.
3. Електропостачання по нічному тарифу: класичне застосування: зарядка акумулятора ніччю за низькою ціною на електроенергію та розрядка протягом дня.
4. Промисловість: утилізація скидного низькопотенційного тепла (наприклад, від систем охолодження обладнання) для обігріву технологічної води або приміщень.

5. Бустерні системи ГВП: Компактні акумулятори встановлюються безпосередньо під раковиною. Користувач миттєво отримує гарячу воду, поки основний котел або проточний теплообмінник ще не вийшли на режим. Це економить воду та енергію.



Рис. 2.6 Тепловий акумулятор від фірми Sunamp-Терео на базі натрій-ацетату тригідрату.

Системи акумуляції тепла на основі натрій-ацетату тригідрату – це технологія, що має великі перспективи для комерційного застосування. Вона пропонує унікальну комбінацію високої енергоємності, компактності, контрольованості та екологічної безпеки. Незважаючи на певні інженерні виклики (розшарування), вони успішно вирішуються сучасними методами. Ця технологія є ключовим елементом для підвищення ефективності та автономності систем опалення на основі відновлюваних джерел енергії та для ефективного використання нічних тарифів на електроенергію. Таким чином його унікальні фазово-перехідні властивості можуть стати надзвичайно важливим і економічно доцільним джерелом тепла під час блекаутів, оскільки процес виділення енергії є повністю пасивним і не потребує жодного зовнішнього джерела енергії – ініціювання кристалізації здійснюється механічним тригером.

2.4 Застосування теплових насосів для підтримання мікроклімату.

Тепловий насос (ТН) — це холодильна машина, що працює у зворотному циклі Карно та забезпечує перенесення теплоти від джерела з нижчою температурою до споживача з вищою температурою за рахунок підведення електричної енергії.

Теплові насоси (ТН) перетворюють електричну енергію в корисне теплове (або холодове) навантаження з високою ефективністю (COP – коефіцієнт продуктивності). Для теплиць це дає: вищу енергоефективність порівняно з безпосереднім електрообігріванням, чи паливними котлами. Також дає можливість одночасного опалення й охолодження (рекуперація тепла), низький рівень локальних викидів і добра інтеграція з буферними теплоаккумуляторами або геліосистемами. Практична COP для систем для теплиць варіює, залежно від типу (повітря-джерело, ґрунт-джерело, вода-джерело) та умов експлуатації. Найчастіше у теплицях використовують Air-source насоси – прості та дешеві в монтажі, але COP падає при дуже низьких зовнішніх температурах. Ground-source / water-source – завдяки більш стабільній температурі джерела тепла, вищі COP у зимовий період, дорожчий монтаж (горизонтальні/вертикальні зонди або замкнутий контур). Водяні (lake/pond-source) – якщо поруч є водойма, дають хороші COP.



Рис. 2.7 Зовнішній вигляд Інверторного теплового насоса Aquaviva Superior Split 19 (19.21 кВт).

Конструкція теплового насоса:

Класичний тепловий насос складається з чотирьох основних елементів:

- Випарник. Призначений для відбору теплоти від низькопотенційного джерела (повітря, ґрунт, вода). Робоча температура холодоагенту у випарнику для тепличних ТН зазвичай: від -15 до $+10$ °С (повітряні), від 0 до $+12$ °С (ґрунтові/водяні).

- Компресор – Забезпечує стиск холодоагенту та підвищення його температури. Найпоширеніші типи: спіральні (scroll), роторні (rotary), гвинтові (screw — для великих теплиць). Типові параметри: електрична потужність одного компресора: 2–30 кВт, робочий тиск на нагнітанні: 2–3 МПа, ККД електродвигуна: 0.90–0.96.

- Конденсатор. У конденсаторі теплота передається теплоносію системи опалення (вода або повітря). Температура теплоносія для теплиць зазвичай: 30 – 45 °С — низькотемпературні системи (підлоговий обігрів, столи), 45 – 55 °С — повітряні нагрівачі. Дросельний пристрій (ТРВ / ЕРВ) Забезпечує пониження тиску та регулювання масової витрати холодоагенту. В сучасних ТН для теплиць застосовуються електронні розширювальні вентилі, що дозволяють працювати при змінному навантаженні.

Таким чином тепловий насос є високоефективною термодинамічною машиною, оптимальною для теплиць з низькотемпературними системами опалення. Основні інженерні переваги високий COP, модульність, можливість реверсу та інтеграції з акумуляторами тепла. Для гідропонних теплиць найбільш доцільні теплові насоси типу ґрунт–вода або повітря–вода з інверторними компресорами.

Висновки до розділу 2.

У розділі проаналізовано сучасні технічні рішення, спрямовані на забезпечення безперервності технологічних умов гідропонного вирощування рослин у разі відключення електропостачання. Визначено основні вимоги до автономних систем, зокрема надійність, енергоефективність, керованість та адаптивність до змін мікроклімату. Обґрунтовано доцільність використання

натрій-іонних акумуляторів як джерела безперебійного живлення, що характеризуються підвищеною безпекою та стабільністю роботи. Розглянуто систему акумуляції теплової енергії на основі натрій-ацетату як ефективний спосіб збереження тепла при мінімальних енерговитратах. Показано, що застосування теплових насосів дозволяє підтримувати необхідні температурні параметри з високим коефіцієнтом енергоефективності навіть в автономному режимі. Сукупне використання зазначених рішень формує комплексну систему, здатну забезпечити стабільний мікроклімат та знизити ризики втрати врожаю під час блекаутів.

Додатково встановлено, що інтеграція електричних і теплових накопичувачів у єдину систему керування підвищує загальну стійкість гідропонного комплексу до аварійних режимів роботи. Запропоновані рішення створюють передумови для зниження експлуатаційних витрат та підвищення автономності тепличних господарств. Таким чином, розглянуті технології є перспективними для впровадження в умовах нестабільного енергопостачання та можуть бути використані як основа для подальших інженерних удосконалень систем гідропонного вирощування.

3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою роботи було дослідження ефективності комбінованої системи підтримання технологічних умов вирощування рослин у гідропонній системі під час тривалого блекауту. Аналізуючи дослідження, що найбільшу небезпеку при порушенні технологічних умов для рослин становить відсутність енергії у створеній моделі було зосереджено увагу на трьох компонентах автономної енергосистеми:

1. Акумулятор теплової енергії на основі натрій ацетату тригідрату.
2. Тепловий насос.
3. Натрій-іонний акумулятор.

При відтворенні сценарію тривалого відключення електроенергії важливо оцінювати комплексний вплив факторів. Тобто зміни параметрів усіх компонентів резервного забезпечення, щоб визначити їхній вплив на загальний час автономної роботи. Такий підхід дає змогу отримати достовірні висновки щодо ефективності автономної енергосистеми, її обмежень та потенціалу. При моделюванні системи є важливою репрезентативність побудованої математичної моделі. У нашому випадку – це 3 змінних параметри. А саме: Коефіцієнт перетворення теплоти (Coefficient of performance) теплового насосу COP; Ємність натрій-іонного акумулятора; Кількість теплової енергії теплового акумулятора на основі ацетату натрію. Тому було обрано метод побудови фізико-математичних моделей методом декомпозиції (розбивання складнішої задачі на складові), де відображені залежності між ключовими параметрами цих компонентів та час збереження життєво необхідної температури у вирощувальному приміщенні. При створенні фізичної моделі потрібно математично описати унікальну гібридну систему опалення, яка поєднує акумулятор теплової енергії на ацетаті натрію з активним тепловим насосом для забезпечення стабільного теплового режиму.

У межах дослідження побудована система графічних моделей, отриманих на основі рівнянь регресії. Оскільки повне відображення трьох факторів одночасно потребує чотиривимірного графіка, що неможливо

реалізувати у класичному вигляді, прийнято науково обґрунтований підхід: побудова трьох окремих тривимірних поверхонь відгуку, у кожній з яких аналізується взаємодія двох факторів при фіксованому значенні третього (нульового рівня). Така візуалізація дає змогу наочно оцінити структуру впливів і уточнити характер взаємодій між параметрами системи автономного теплопостачання. Модель побудована на трьох незалежних рівняннях, оскільки кожен компонент має власну динаміку, але разом вони утворюють замкнений енергетичний цикл, що забезпечує автономність системи.

Система використовує ключову фізичну перевагу: тепловий насос працює не від холодного зовнішнього повітря, а від відносно теплої контуру теплової батареї (7-15°C) на базі ацетату натрію, що значно підвищує його ефективність. Ацетат натрію слугує стабільним джерелом тепла, що досягає 58°C для підігріву цього приміщення під час кристалізації.

Цикли роботи системи:

Цикл 1: заряджання (є електрика з мережі).

Електрика з мережі → Тепловий насос → Нагрівання ацетату натрію до 55°C (накопичення теплової енергії) → Плавлення ацетату натрію.

Електрика з мережі → заряджання натрій-іонного акумулятора.

Цикл 2: розряджання акумуляторів (блекаут).

Тепловий насос працюючи від натрій-іонного акумулятора відбирає тепло з приміщення де розміщені теплові батареї із ацетатом натрію і передає теплову енергію до теплиць:

Приміщення з акумулятором зі сталою температурою під час використання теплової батареї (~5-10°C) → Тепловий насос → Теплиця (+21°C).

Три незалежні рівняння системи:

Рівняння 1: Фізична модель енергетичного балансу теплиці.

$$Q_{loss} = Q_{walls} + Q_{ventilation} - Q_{equipment}; \quad 1)$$

де:

Q_{loss} – загальні теплові втрати, які потрібно компенсувати [Вт].

Q_{walls} – втрати через огороження (стіни, стеля, підлога) [Вт].

$Q_{ventilation}$ – втрати з вентиляцією (винесення теплого повітря) [Вт].

$Q_{equipment}$ – тепловиділення від гідропонічного обладнання [Вт].

Відповідно розраховуємо кожен складову:

$$Q_{walls} = k \times S \times (T_{in} - T_{out});$$

де:

k – коефіцієнт теплопередачі [$\frac{Вт}{м^2 \times К}$].

S – площа огороження [$м^2$].

T_{in} – температура всередині теплиці [$°C$].

T_{out} – температура зовні теплиці [$°C$].

$$Q_{ventilation} = V_1 \times \rho_{air} \times C_{air} \times (T_{in} - T_{out});$$

Де:

V_1 – об'ємна витрата повітря [$\frac{м^3}{с}$].

ρ_{air} – щільність повітря [$\frac{кг}{м^3}$].

C_{air} – питома теплоємність повітря при сталому тиску [$\frac{Дж}{кг \times К}$].

Беручи до уваги кратність повітрообміну n (скільки разів за годину повністю замінюється весь об'єм повітря в приміщенні), формула набуває вигляду:

$$Q_{ventilation} = \frac{V_{Farm} \times n \times \rho_{air} \times C_{air} \times (T_{in} - T_{out})}{3600};$$

Де:

V_{Farm} – об'єм теплиці [$м^3$].

n – кратність повітрообміну [$\frac{об'єм}{год}$].

$$Q_{equipment} = Q_{lights} + Q_{pumps} + Q_{fans} + Q_{controls};$$

Де:

Q_{lights} – тепловиділення від світла [Вт].

Q_{pumps} – тепловиділення від циркуляційних насосів [Вт].

Q_{fans} – тепловиділення від вентиляторів для циркуляції повітря [Вт].

$Q_{controls}$ – тепловиділення від контролерів, датчиків, автоматики [Вт].

Отже, повна фізична модель енергетичного балансу теплиці у вигляді рівняння:

$$Q_{loss} = k \times S \times (T_{in} - T_{out}) + \frac{V_{Farm} \times n \times \rho_{air} \times C_{air} \times (T_{in} - T_{out})}{3600} - (Q_{lights} + Q_{pumps} + Q_{fans} + Q_{controls})$$

Після об'єднання параметрів:

$$Q_{loss} = k \times S + \left(\frac{V_{Farm} \times n \times \rho_{air} \times C_{air}}{3600} \right) \times (T_{in} - T_{out}) - Q_{equipment} \quad 2)$$

У нашому випадку розрахунок проводився на прикладі теплиці загальною площею 100м² із вирощування томатів. Розглядався сценарій блекаута на 24 год у зимову пору року, коли середня температура повітря за даними Українського гідрометеорологічного центру є в межах від -6°С до 0°. Площа огороження і врахуванням утеплення підлоги становить 220 м². Коефіцієнт теплопередачі подвійного скла $k=2.5-3.5$ Вт/(м²·К), а для Полікарбонату (10мм): $k=2.5-3.0$ Вт/(м²·К). Кратність повітрообміну для зимових теплиць рекомендована зимою (з рекуперацією): 0.5-1.0 об/год – мінімальна вентиляція для свіжого повітря. Необхідна освітленість для томатів 350-400 мкмоль/(м²·с). Ефективність LED: від 2 до 3.0 мкмоль/Дж. Середнє споживання циркуляційних насосів 150-300 Вт. При цьому більша частина енергії (понад 60%) йде на нагрівання поживного розчину. Тепловиділення вентиляторів і систем автоматизації складає приблизно 450 Вт.

Це дозволяє скласти таблицю основних параметрів і провести обчислення.

Таблиця 4.1

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Коефіцієнт теплопередачі	k	3.0	Вт/(м ² ·К)

Площа огородження	S	220	м^2
Температура всередині	T_{in}	21	$^{\circ}\text{C}$
Температура зовні	T_{out}	-2	$^{\circ}\text{C}$
Кратність повітрообміну	n	0.5	об/год
Об'єм теплиці	V_{Farm}	300	м^3
Щільність повітря	ρ_{air}	1,2	$\text{Кг}/\text{м}^3$
Теплоємність повітря	C_{air}	1005	$\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$
Тепловиділення обладнання	$Q_{equipment}$	5280 (сер.)	Вт
Втрати через стіни	$k \cdot S \cdot \Delta T$	13860	Вт
Результат втрат	Q_{loss}	9630	Вт

Враховуючи зменшення температури повітря вночі, а також зменшення потреби в енергії для обладнання, адже є важливим дотримання природніх циклів у вирощуванні цієї культури рослин, витрати на енергію є більші приблизно в 1.5 рази. Тому у подальших розрахунках ми беремо найбільші витрати.

Рівняння 2: Фізична модель теплового акумулятора (ацетат натрію).

$$E_{total} = E_{phase} + E_{solid} + E_{liquid} \quad 3)$$

Де:

E_{total} – загальна доступна енергія [Дж].

E_{phase} – енергія фазового переходу (кристалізація) [Дж].

E_{solid} – явна теплота твердої фази [Дж].

E_{liquid} – явна теплота рідкої фази (при охолодженні) [Дж].

Тепловий акумулятор на базі ацетату натрію працює у двох режимах:

1. Фазовий перехід (кристалізація) → виділення теплоти при початковій температурі 58 °С.
2. Охолодження твердої фази → зниження температури після завершення кристалізації.

Відповідно розраховуємо кожен складову:

$$E_{\text{phase}} = m_{\text{salt}} \times L_f$$

Де:

m_{salt} – маса ацетату натрію тригідрату ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) [Кг].

L_f – питома теплота кристалізації [Дж/Кг].

Після завершення кристалізації акумулятор продовжує віддавати тепло при зниженні температури від T_{phase} до T_{min} :

$$E_{\text{solid}} = m_{\text{salt}} \times C_{\text{solid}} \times (T_{\text{phase}} - T_{\text{min}})$$

Де:

C_{solid} – Теплоємність твердої фази [Дж/(Кг · К)].

T_{phase} – температура фазового переходу [°С].

T_{min} – мінімальна температура, до якої охолоджується акумулятор [°С].

Якщо акумулятор був нагрітий вище температури плавлення (наприклад, до 65°С), він може віддати додаткову енергію при охолодженні від T_{init} до T_{phase} .

$$E_{\text{liquid}} = m_{\text{salt}} \times C_{\text{liquid}} \times (T_{\text{init}} - T_{\text{phase}})$$

Де:

C_{liquid} – Теплоємність рідкої фази [Дж/(Кг · К)].

T_{init} – початкова температура (після розплавлення) [°С].

Таблиця 4.2

Властивості ацетату натрію тригідрату ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$):

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці вимірювання
Температура кристалізації	T_{phase}	58°С = 331К	°С або К

Питома теплота плавлення	L_f	264000	Дж/Кг
Питома теплота плавлення	L_f	264	кДж/Кг
Питома теплота плавлення	L_f	73.33	Ват · год/Кг
Щільність рідкої фази	ρ_{liquid}	1280	Кг/м ³
Щільність твердої фази	ρ_{solid}	1450	Кг/м ³
Теплоємність твердої фази	C_{solid}	1800	Дж/(Кг · К)
Теплоємність рідкої фази	C_{liquid}	3200	Дж/(Кг · К)

Час роботи акумулятора:

$$t_{thermal} = E_{thermal} / Q_{extract}$$

Де:

$t_{thermal}$ – час роботи акумулятора [Год].

$Q_{extract}$ – потужність відбору енергії тепловим насосом.

Отже, фізична модель загальної доступної енергії від акумулятора на базі ємностей заповнених ацетатом натрію у вигляді рівняння:

$$E_{total} = (m_{salt} \times L_f) + (E_{solid} = m_{salt} \times C_{solid} \times (T_{phase} - T_{min})) + (m_{salt} \times C_{liquid} \times (T_{init} - T_{phase}))$$

Після об'єднання параметрів і зведенню подібних доданків:

$$E_{total} = m_{salt} \times [L_f + C_{solid} \times (T_{phase} - T_{min}) + C_{liquid} \times (T_{init} - T_{phase})]$$

У нашому випадку як тепловий акумулятор використовується ацетат натрію тригідрат ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) – один з найефективніших матеріалів для фазово-перехідних акумуляторів тепла. Вибір цього матеріалу обумовлений його високою питомою теплотою контрольованої кристалізації $L_f = 264$ кДж/кг

(73.33 Вт·год/кг). Температура фазового переходу $T_{\text{phase}} = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ є достатньою для роботи теплового насоса, оскільки забезпечує значну різницю температур з тепличним приміщенням ($21\text{ }^{\circ}\text{C}$) без надмірного зниження коефіцієнта ефективності COP. Для розрахунку об'єму теплової батареї треба врахувати щільність рідкої фази $C_{\text{liquid}} = 1280\text{ кг/м}^3$, та урахування коефіцієнта запасу 1.5 (теплообмінник та розширення розчину). Для зменшення теплових втрат через ізоляцію використовується матеріал з коефіцієнтом теплопередачі $k_{\text{insulation}} = 0.02\text{-}0.04\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$, що при площі поверхні 3-7 м² дає втрати менше 0.1 кВт·год за добу (менше 1% від загальної енергії). Крім енергії фазового переходу (75% від загальної), акумулятор віддає енергію тепла при охолодженні твердої фази від $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ до мінімальної температури $T_{\text{min}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплоємність твердої фази $c_{\text{solid}} = 1800\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ забезпечує додаткові 0.024 кВт·год на кілограм маси. Мінімальна температура $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ обрана з умов ефективної роботи теплового насоса - при нижчих температурах випарника різко знижується COP, що робить систему неефективною. Загальна питома енергоємність акумулятора складає 0.09733 кВт·год/кг (включаючи фазовий перехід та охолодження твердої фази. Ефективність використання запасеної енергії $n_{\text{storage}} = 0,90\text{-}0,95$ з урахуванням неповної кристалізації (5-10% розчину може залишитись у переохолодженому стані) та теплових втрат через ізоляцію.

Це дозволяє скласти таблицю основних параметрів і провести обчислення.

Таблиця 4.3

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці	Примітка
Необхідна маса ацетату натрію	m_{salt}	165	кг	На 1 год
Питома теплота плавлення	L_f	264	КДж/Кг	Із властивостей.
Температура кристалізації	T_{phase}	$58\text{ }^{\circ}\text{C} = 331\text{ K}$	$^{\circ}\text{C}$ або К	Із властивостей.

Теплоємність твердої фази	C_{solid}	1800	Дж/(Кг · К)	Із властивостей.
Мінімальна температура охолодження	T_{min}	10	°С	Обмеження COP
Теплоємність рідкої фази	C_{liquid}	3200	Дж/(Кг · К)	Теплоємність рідкої фази
Початкова температура	T_{init}	60°С	°С	Після зарядки

Рівняння 3: Фізична модель теплообміну у системі за допомогою парокompресійного теплового насоса

Тепловий насос переносить енергію від відносно холодного джерела (контур теплообмінника в теплових батареях) до гарячого споживача (теплиця). Тобто на кожен 1 кВт електричної енергії насос передає COP · кВт теплової енергії. Тоді основне рівняння енергетичного балансу теплового насоса:

$$Q_{\text{pump}} = COP \cdot P_{\text{elec}}$$

Де:

Q_{pump} – теплова потужність на виході (передається в теплицю) [кВт].

COP – коефіцієнт перетворення (Coefficient Of Performance).

P_{elec} – електрична потужність компресора [кВт].

Енергія, що відбирається від теплових батарей:

$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{pump}} \cdot P_{\text{elec}}$$

Q_{ext} – потужність відбору енергії тепла від системи батарей [кВт].

Теоретична межа ефективності теплового насоса визначається циклом Карно, де коефіцієнт корисної дії циклу Карно набуває найбільших значень коли температура нагрівника є якомога більша, а температура охолоджувача — якомога менша. співвідношенням абсолютних температур джерела тепла та теплового споживача. В умовах блекауту, коли тепловий насос живиться від

автономної батареї, практичне значення коефіцієнта перетворення набуває критичної ролі, оскільки безпосередньо визначає тривалість роботи системи при обмеженому запасі електроенергії. Тому для забезпечення енергоефективної та стабільної роботи доцільно мінімізувати різницю температур між джерелом низькопотенційного тепла та системою опалення, що дозволяє зменшити навантаження на акумуляторну систему. Іншими словами Для ідеального циклу теплового насоса коефіцієнт перетворення не залежить від теплофізичних властивостей робочої речовини і визначається рівнянням:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

Де:

COP_{Carnot} – Теоретична межа коефіцієнта перетворення.

T_{cond} – абсолютна температура конденсатора (гаряча сторона, в теплиці) [K].

T_{evap} – абсолютна температура випаровувача (контур теплообмінника в теплових батареях) [K].

Реальний тепловий насос має втрати:

$$COP = N_{Carnot} \cdot COP_{Carnot}$$

Де:

N_{Carnot} – ефективність відносно циклу Карно.

Типові значення для інверторних парокомпресійних насосів:

Старі/прості моделі: $N_{Carnot} = 0,30-0,35$.

Стандартні інверторні: $N_{Carnot} = 0,35-0,40$.

Високоєфективні: $N_{Carnot} = 0,40-0,45$.

Конденсатор віддає тепло повітрю теплиці. Для ефективного теплообміну холодоагент має бути гарячішим за повітря:

$$T_{Cond} = T_{air} + \Delta T_{Cond}$$

Де:

ΔT_{Cond} – температурний напір конденсатора [K].

T_{air} – температура повітря в теплиці.

Випарник відбирає енергію від системи теплових батарей. Для ефективного теплообміну холодоагент має бути холоднішим ніж теплові батареї:

$$T_{evap} = T_{bat} + \Delta T_{evap}$$

Де:

T_{evap} – температурний напір випаровувача в тепловому насосі [К].

T_{bat} – температура на контурі теплообмінника в натрій-ацетатних батареях [К].

Після об'єднання параметрів і зведенню подібних доданків:

$$P_{elec} = Q_{pump} \cdot \left(\frac{T_{Cond} - T_{evap}}{N_{Carnot} \cdot T_{Cond}} \right) = \frac{Q_{pump}}{COP};$$

$$Q_{ext} = Q_{pump} \cdot \left(1 - \frac{T_{cond} - T_{evap}}{N_{Carnot} \cdot T_{Cond}} \right);$$

$$COP = N_{Carnot} \cdot \left(\frac{T_{Cond}}{T_{Cond} - T_{evap}} \right);$$

Враховуючи, що ефективність відносно циклу Карно у нашому випадку дорівнює 40%, температурний напір конденсатора і випарника 10К можна скласти таблиці основних параметрів і провести обчислення.

Таблиця 4.4 (Вхідні дані)

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
1	теплова потужність для теплиці	Q_{pump}	14.6	кВт
2	Час роботи системи	t_{sys}	24	год
3	Кількість теплових батарей	M_{bat}	24	од
4	Енергія однієї батареї	E_{bat_termal}	16	кВт·год

5	Загальна енергія теплових батарей	E_{therm}	384	кВт·год
6	Температура теплиці	T_{air}	21 / 294	°C/K
7	Температура теплообмінника в батареях	T_{bat}	12 / 285	°C/K

Таблиця 4.5 (Параметри теплообмінників)

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
1	Температурний напір конденсатора	ΔT_{Cond}	10	К
2	Температурний напір випарника	ΔT_{evap}	10	К
3	Температура конденсатора	T_{cond}	31 / 304	°C/K
4	Температура випарника	T_{evap}	2 / 275	°C/K
5	Різниця температур	ΔT_{pump}	29	К

Таблиця 4.6 (Термодинамічні параметри)

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
1	Ефективність відносно Карно	N_{Carnot}	0,40	-
2	Ідеальний COP (Карно)	COP_{Carnot}	10,48	-
3	Реальний COP	COP	4,3	-

Таблиця 4.6 (Розраховані характеристики насоса)

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
1	Електрична потужність компресора	P_{elec}	3,5	кВт
2	Потужність відбору від батареї	Q_{ext}	11,2	кВт
3	Номінальна теплова потужність	Q_{nom}	15-16	кВт
4	Струм споживання (220В, 1-фаза)	I_{220}	15,9	А
5	Струм споживання (380В, 3-фази)	I_{380}	5,3	А

Таблиця 4.7 (Енергетичний баланс за 24 год)

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
1	Теплова енергія до теплиці	E_{pump}	350,4	кВт·год
2	Електрична енергія від Na-ion батареї	E_{bat}	84	кВт·год
3	Теплова енергія від натрій-ацетатних батарей	$E_{\text{bat_termal}}$	268,8	кВт·год
4	Запас теплової енергії	E_{reserve}	115,2	кВт·год
5	Коефіцієнт запасу	K_{reserve}	1,43	-

Таблиця 4.8 (технічні характеристики теплового насоса)

Параметр	Значення	Примітка
Тип	Інверторно-парокомпресійний	Обов'язково
Номінальна потужність (опалення)	15-16 кВт	Запас 10%
Електрична потужність	3.5-4.0 кВт	При COP = 4
COP (A7/W35)	≥ 4.0	Згідно EN 14511
Діапазон роботи випарника	-5°C ... +20°C	Має працювати при +2°C
Холодоагент	R410A або R32	Екологічний

Живлення	220В 1-фаза або 380В 3-фази	Струм до 16А
Рівень шуму	< 60 дБ(А)	Для приміщення

Комплексна фізико-математична модель забезпечення теплом гідропонної теплиці:

виводиться фізико-математична модель тривалості автономної роботи системи підтримання температури. Виведення ґрунтується на двох ключових передумовах:

1. Система складається з двох незалежних накопичувачів енергії: електричної батареї для живлення теплового насоса та фазового теплового акумулятора на основі натрій ацетату натрію, що є джерелом тепла.
2. Теплові втрати теплиці лінійно залежать від різниці температур із зовнішнім середовищем, що дозволяє сформулювати потужність теплопостачання як сталу величину для заданих умов.

Основою моделі є принцип мінімального ресурсу (принцип «слабкої ланки»). Система може функціонувати лише за одночасного виконання двох умов: наявності електроенергії для роботи теплового насоса та наявності теплової енергії в акумуляторі для її підвищення. Тому загальний час автономії не може перевищувати час вичерпання будь-якого з цих двох ресурсів, що аналітично виражається за допомогою функції мінімуму (\min). Цей підхід точно відображає каскадний характер відмови системи. Фізична інтерпретація отриманого рівняння дозволяє не лише прогнозувати час роботи, але й визначати обмежуючий фактор для конкретної конфігурації. Крім того, модель у явному вигляді показує, як на автономність впливають енергоефективність насоса (COP), ємності накопичувачів та теплові якості теплиці, що є основою для подальшого інженерного аналізу та оптимізації системи.

Втрати енергії тепла гідропонної теплиці через стіни залежать від температури повітря на вулиці та всередині теплиці. Повний розрахунок втрат тепла дозволив впровадити додатковий коефіцієнт k_2 для оптимізації розрахунків. Тоді формула втрат тепла набуде вигляду:

$$Q_{loss} = k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})$$

$$Q_{loss} = Q_{heat}$$

Де:

k_2 – додатковий коефіцієнт теплопередачі, що узагальнює втрати теплової потужності $[\frac{Вт}{м^2 \times К}]$.

Q_{heat} – Узагальнена потреба у тепловій потужності [Вт].

Q_{loss} – Загальні теплові втрати, які потрібно компенсувати [Вт].

Враховуючи, що існує два джерела обмеження часу роботи слід створити фізико-математичну модель для кожного із них:

А) Електричне обмеження (батарея + насос):

$$Q_{heat} = COP \cdot W_{Pump}$$

$$E_{bat} = t_1 \cdot W_{Pump}$$

$$t_1 = \frac{E_{bat}}{W_{Pump}} = \frac{E_{bat}}{Q_{heat}/COP} = \frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})}$$

Де:

E_{bat} – Ємність батареї [кВт·год].

COP – Енергоефективність теплового насоса у нашій системі.

t_1 – Час роботи теплового насоса в залежності від електричної ємності натрій-іонної батареї.

В) Обмеження доступної кількості тепла (ацетат-натрієвий акумулятор):

$$Q_{acc} = Q_{heat} \cdot t_2$$

$$t_2 = \frac{Q_{acc}}{Q_{heat}} = \frac{Q_{acc}}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})}$$

Де:

Q_{acc} – Запас енергії теплового акумулятора.

Система перестане працювати, коли першим вичерпається будь-який з двох ресурсів, тому реальний час автономії — це менше з двох можливих часів:

$$t = \min(t_1, t_2)$$

$$t = \min\left(\frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})}, \frac{Q_{acc}}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})}\right)$$

Прогноз часу автономної роботи системи опалення є непрямим вимірюванням, оскільки величина t обчислюється за складеною формулою, що залежить від множини вимірюваних параметрів: E_{bat} , COP , k_2 , T_{in} , T_{out} та Q_{acc} . Кожен із цих параметрів містить власну похибку вимірювання, яка сукупно впливає на кінцевий результат. Абсолютна похибка Δt для функції кількох змінних $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ обчислюється як корінь квадратний із суми квадратів добутків часткових похідних на абсолютні похибки аргументів. Оскільки модель має мультиплікативний характер просте арифметичне додавання похибок тут неприйнятне. Даний метод дозволяє лінійно апроксимувати внесок кожної складової похибки у загальну невизначеність, застосовуючи принцип перенесення похибок для функцій багатьох змінних. Крім того, наявність функції мінімуму у визначальному рівнянні створює особливу ситуацію: коли розрахункові часи t_1 та t_2 близькі, виникає додаткова невизначеність щодо обмежуючого фактора системи. Метод часткових похідних дає змогу окремо оцінити похибки для кожного сценарію та проаналізувати перетин їх довірчих інтервалів, що є вирішальним для коректної інтерпретації надійності прогнозу.

4. ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Це дозволяє провести наступні обчислення для кожного рівняння:

Час, обмежений електричною батареєю t_1 .

$$\Delta t_1 = \left(\sqrt{\left(\frac{\partial t_1}{\partial E_{bat}} \cdot \Delta E_{bat} \right)^2 + \left(\frac{\partial t_1}{\partial COP} \cdot \Delta COP \right)^2 + \left(\frac{\partial t_1}{\partial k_2} \cdot \Delta k_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial t_1}{\partial T_{in}} \cdot \Delta T_{in} \right)^2 + \left(\frac{\partial t_1}{\partial T_{out}} \cdot \Delta T_{out} \right)^2} \right)$$

Для зручності $T_{in} - T_{out} = \Delta T$, тоді поетапно виводимо формулу для розрахунку похибки часу, при умові, що є обмеження електричною батареєю.

$$t_1 = E_{bat} \cdot \frac{COP}{k_2 \cdot \Delta T}; \quad \frac{\partial t_1}{\partial E_{bat}} = \frac{COP}{k_2 \cdot \Delta T} \cdot \frac{\partial E_{bat}}{\partial E_{bat}} = \frac{t_1}{E_{bat}};$$

$$t_1 = COP \cdot \frac{E_{bat}}{k_2 \cdot \Delta T}; \quad \frac{\partial t_1}{\partial COP} = \frac{E_{bat}}{k_2 \cdot \Delta T} \cdot \frac{\partial COP}{\partial COP} = \frac{t_1}{COP};$$

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{k_2} \cdot \frac{COP \cdot E_{bat}}{\Delta T}; \quad \frac{\partial t_1}{\partial k_2} = E_{bat} \cdot COP \cdot (T_{in} - T_{out})^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial k_2} (k_2^{-1}) = \\ &= E_{bat} \cdot COP \cdot (T_{in} - T_{out})^{-1} \cdot (-k_2^{-2}) = -\frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2^2 \cdot (T_{in} - T_{out})} = -\frac{t_1}{k_2}; \end{aligned}$$

Розраховуємо часткові похідні:

$$\frac{\partial t_1}{\partial T_{in}} = \frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2} \cdot \frac{\partial}{\partial T_{in}} ((T_{in} - T_{out})^{-1}) = \frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2} \cdot (-1) \cdot$$

$$(T_{in} - T_{out})^{-2} \cdot \frac{\partial}{\partial T_{in}} (T_{in} - T_{out}) = -\frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})^2} = -\frac{t_1}{T_{in} - T_{out}};$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial T_{out}} = \frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2} \cdot \frac{\partial}{\partial T_{out}} ((T_{in} - T_{out})^{-1}) = \frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2} \cdot (-1) \cdot$$

$$(T_{in} - T_{out})^{-2} \cdot \frac{\partial}{\partial T_{out}} (T_{in} - T_{out}) = \frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})^2} = \frac{t_1}{T_{in} - T_{out}};$$

$$\Delta t_1 = t_1 \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta E_{bat}}{E_{bat}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_{COP}}{COP}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k_2}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{in}^2 + \Delta T_{out}^2}{(T_{in} - T_{out})^2}\right)^2} \right);$$

Час роботи від теплового акумулятора t_2 .

$$\Delta t_2 = \left(\sqrt{\left(\frac{\partial t_1}{\partial Q_{acc}} \cdot \Delta Q_{acc}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_1}{\partial COP} \cdot \Delta E_{COP}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_1}{\partial k_2} \cdot \Delta k_2\right)^2 + \left(\frac{\partial t_1}{\partial T_{in}} \cdot \Delta T_{in}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_1}{\partial T_{out}} \cdot \Delta T_{out}\right)^2} \right)$$

Так само поетапно виводимо формулу для розрахунку похибки часу, при умові, що є обмеження ємністю теплового акумулятора і розраховуємо часткові похідні:

$$\frac{\partial t_2}{\partial Q_{acc}} = \frac{1}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})} \cdot \frac{\partial Q_{acc}}{\partial Q_{acc}} = \frac{t_2}{E_{bat}} = \frac{1}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})};$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_2}{\partial k_2} &= Q_{acc} \cdot (T_{in} - T_{out})^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial k_2} (k_2^{-1}) = Q_{acc} \cdot (T_{in} - T_{out})^{-1} \cdot (-k_2^{-2}) = \\ &= -\frac{Q_{acc}}{k_2^2 \cdot (T_{in} - T_{out})}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_2}{\partial T_{in}} &= \frac{Q_{acc}}{k_2^2} \cdot \frac{\partial}{\partial T_{in}} ((T_{in} - T_{out})^{-1}) = \frac{Q_{acc}}{k_2^2} \cdot (-1) \cdot (T_{in} - T_{out})^{-2} = \\ &= -\frac{Q_{acc}}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_2}{\partial T_{out}} &= \frac{Q_{acc}}{k_2^2} \cdot \frac{\partial}{\partial T_{out}} ((T_{in} - T_{out})^{-1}) = \frac{Q_{acc}}{k_2^2} \cdot (T_{in} - T_{out})^{-2} = \\ &= \frac{Q_{acc}}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})^2}; \end{aligned}$$

$$\Delta t_2 = t_2 \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta Q_{acc}}{Q_{acc}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k_2}{k_2}\right)^2 + \frac{\Delta T_{in}^2 + \Delta T_{out}^2}{(T_{in} - T_{out})^2}} \right);$$

Таким способом було отримано формули для розрахунку похибки часу при роботі системи під час блекаута.

При проектуванні системи альтернативного обігріву гідропонічної теплиці критично важливою умовою є врахування ємності акумуляторів обох видів із запасом. Це пов'язано з тим, що реальні умови завжди відрізняються від розрахункових: тепловтрати змінюються з вітром і вологістю, COP теплового насоса падає при сильному морозі, батареї втрачають частину ємності на холоді, а тепловий акумулятор може віддати менше енергії при неповній регенерації. Запас у системі забезпечує роботу навіть у найгіршому сценарії, коли зовнішня температура нижча за розрахункову, тривалість відключення більша, а внутрішні джерела тепла мінімальні. Тому при подальших розрахунках ємність натрій-іонного акумулятора була збільшена із 84 кВт·год до 100 кВт·год, а ємність теплового акумулятора була 400 кВт·год. Також при введенні коефіцієнта k_2 були враховані максимальні втрати тепла, тому із рівняння (7) при підстановці параметрів теплиці, значення k_2 буде 0,650 кВт/К.

$$k_2 = \frac{Q_{\text{loss}} + Q_{\text{equipment}} - \frac{V_{\text{Farm}} n \rho_{\text{air}} C_{\text{air}}}{3600} (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})}{S}$$

Це дозволяє скласти таблицю основних параметрів і провести обчислення.

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення	Абсолютна Похибка Δx	Відносна Похибка %
ΔT	К	23	0,707	3,07
E_{bat}	кВт·год	100	2,0	2%
COP	-	4,3	0,1	2,33
Q_{acc}	кВт·год	400	20	5%
k_2	кВт/К	0,650	0,025	3,85%

Відповідно:

$$t = \min\left(\frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})}, \frac{Q_{acc}}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})}\right)$$

$$t_1 = \frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})} = \frac{100 \cdot 4,3}{0,650 \cdot 23} = 28,76 \text{ годин.}$$

$$t_2 = \frac{Q_{acc}}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})} = \frac{400}{0,650 \cdot 23} = 26,75 \text{ годин.}$$

Розрахунок похибки Δt_1 :

$$\Sigma_1 = 0.000400 + 0.000541 + 0.001479 + 0.000945 = 0.003365;$$

$$\Delta t_1 = 28,76 \cdot \sqrt{0.003365} = \pm 1,67 \text{ год.}$$

Розрахунок похибки Δt_2 :

$$\Sigma_2 = 0.002500 + 0.001479 + 0.000945 = 0.004924;$$

$$\Delta t_2 = 26,75 \cdot \sqrt{0.004924} = \pm 1,88 \text{ год.}$$

Таким чином був визначений час автономної роботи альтернативної системи забезпечення теплом гідропонної теплиці. Враховуючи, що параметри теплового акумулятора і натрій-іонної батареї не залежать один від одного система по суті є двома послідовно з'єднаними підсистемами з різними фізичними принципами накопичення та віддачі енергії. Тому коректне моделювання вимагає розгляду окремих енергетичних балансів для кожної підсистеми, які об'єднуються лише через спільну функцію – тепловий насос. Саме ця незалежність ресурсів обумовлює необхідність використання функції мінімуму у фінальному рівнянні, яке формалізує принцип "найслабшої ланки" у ланцюзі живлення.

Аналіз похибок (Чутливість):

Виявлення того, який параметр вносить найбільший внесок у загальну похибку, є ключовим для інженерного вдосконалення системи. У нашому випадку найбільш значущим джерелом похибки є коефіцієнт продуктивності теплового насоса (COP) та точність визначення тепловтрат k_2 . При цьому,

ємність самої батареї E_{bat} є відносно стабільним параметром. Також слід зазначити, що рівнянні 2 найбільший внесок у похибку робить похибка ємності теплового акумулятора Q_{acc} (5%). Хоча тепловтрати k_2 також вносять суттєву похибку, саме неточність ємності теплового накопичувача є критичною. З огляду на це, для автономної ферми з тепловим насосом, що працює від натрій-іонної батареї та відбирає тепло з теплової батареї, першочерговим завданням є підвищення точності оцінки теплової ємності акумулятора та реальних теплових втрат системи.

Для рівняння 1

Джерело похибки	Внесок у суму квадратів	Відносна похибка ε_x
ΔT	0,001479	3,85%
COP	0,000945	3,07%
E_{bat}	0,000541	2,33%
k_2	0,000400	2,00%

Для рівняння 2

Джерело похибки	Внесок у суму квадратів	Відносна похибка ε_x
ΔT	0,001479	3,85%

COP	0,000945	3,07%
Q_{acc}	0,002500	5,00%
k_2	0,000400	2,00%

На основі отриманих рівнянь були побудовані поверхні відгуку при фіксації $k_2, COP, \Delta T$.

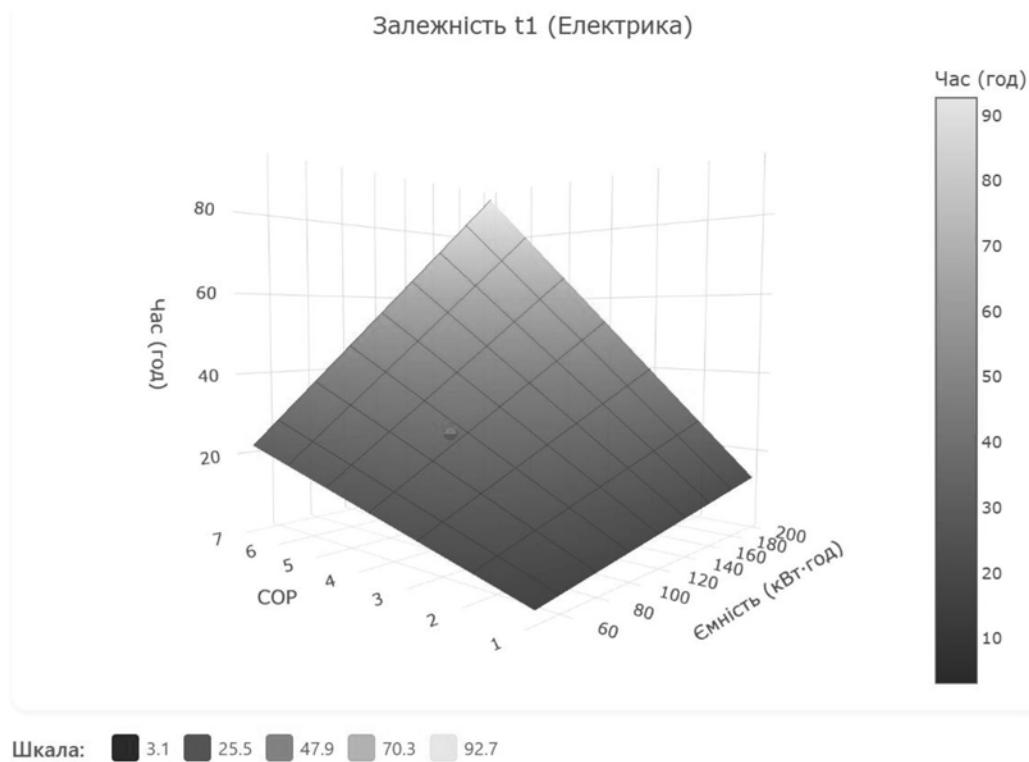


Рис.4.1 Поверхні відгуку $t_1 = \frac{E_{bat} \cdot COP}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})}$

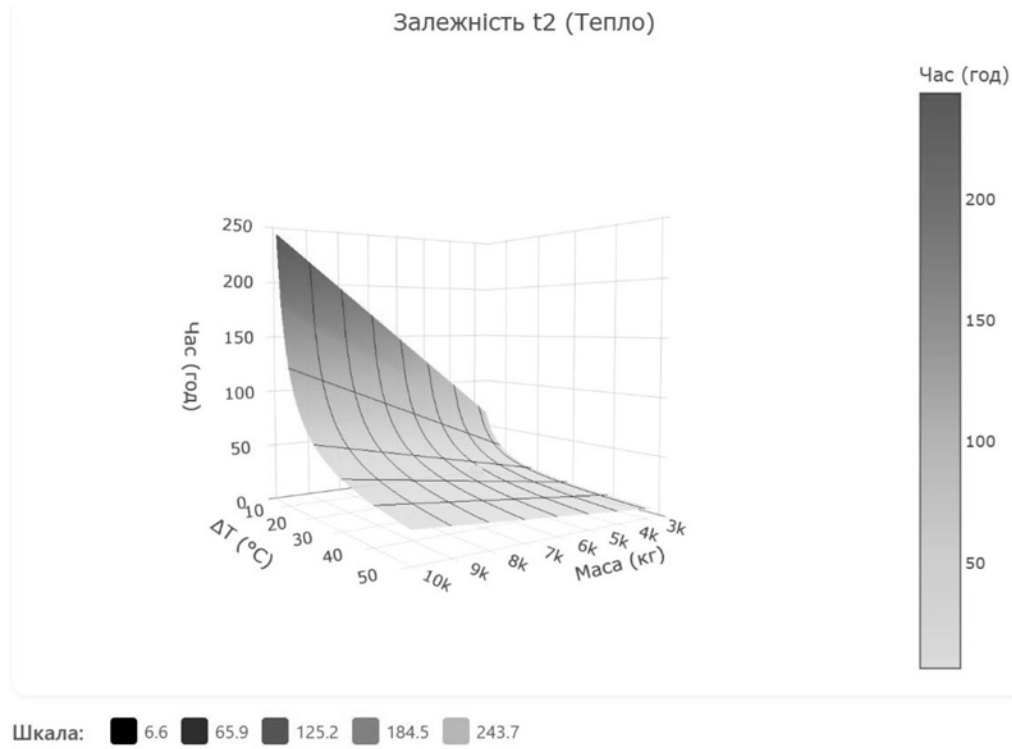


Рис.4.1 Поверхні відгуку $t_2 = \frac{Q_{acc}}{k_2 \cdot (T_{in} - T_{out})}$

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Структурно-функціональний аналіз травмонебезпечних ситуацій впродовж виконання робіт

Найбільш характерними причинами виникнення нещасних випадків є: відсутність або недостатній інструктаж персоналу про правила безпеки, порушення технологічного процесу, несправність устаткування, пристосування та інструмент або його невідповідність умовам виконуваних робіт, відсутність огорож, написів, невідповідна спецодяг, недостатнє освітлення, низький рівень технічної культури виробництва. Усунення зазначених недоліків сприяє різкому поліпшенню умов праці і, отже, зниженню травматизму.

Під час робіт з тепличним обладнанням можливі такі небезпечні чинники:

- ураження електричним струмом при дотику до струмоведучих частин електричних машин;
- хімічні опіки від дії компонентів підживлювальних розчинів;
- термічні опіки при приготуванні розчинів;
- отруєння шкідливими випарами;
- травми різного роду механічного характеру.

Будь-який небезпечний виробничий чинник незалежно від його виду, рівня та інших властивостей має певну зону дії. Якщо розміри цієї зони мають чітко фіксовані значення, то її можна вважати постійною. Якщо у процесі роботи така зона може змінюватися внаслідок зміни рівня небезпечного чинника, його переміщень у просторі, то вона буде змінною. У деяких випадках (аварійна ситуація) небезпечний виробничий чинник може значно виходити за межі визначено (фіксованої) зони. При цьому небезпека травмування працюючого виникає уже за межами небезпечної зони. Тому кожен працівник

на конкретній машині чи певному робочому місці завжди повинен знати про таку небезпеку. Постійні небезпечні зони існують або виникають у передачах, при обробці деталей на токарних, свердлильних, заточувальних верстатах, біля різальних інструментів, у пресах, пневматичних та гідравлічних молотах, штампувальних верстатах, під машинами та платформами, піднятими за допомогою гідравлічної чи іншої системи [3].

Небезпечні умови можуть визначатися недоліками конструкцій машин, технологічного обладнання і процесів, низьким рівнем організації виробництва (неефективність або відсутність необхідного контролю, низькі професійний рівень працюючих, підготовка їх з охорони праці), недостатньою надійністю виробничого обладнання тощо. Вони відіграють пріоритетну роль у формуванні й виникненні виробничих небезпек – певного стану, за якого виникає реальна загроза аварії або травми. Це пояснюється тим, що навіть при наявності кількох небезпечних виробничих факторів на певному робочому місці, але якщо жоден з них не має умов, за яких він міг би діяти на людину, то на цьому робочому місці відсутня реальна небезпека травмування. Інша справа, коли такі умови є, але про них працюючий не знає. Процес виявлення небезпечних умов у деяких випадках може бути досить складним, тому необхідно проводити спеціальні дослідження. Аналіз небезпечних умов, які існують чи виникають безпосередньо на виробництві показав, що за характером дії їх можна поділити на групи, які [3]:

- характеризують стан або рівень безпеки виробничого обладнання або певного робочого місця (відсутність огороження рухомих деталей або робочих органів, відсутність або недосконалість спеціальних технічних засобів безпеки: блокувальних пристроїв, засобів сигналізації тощо), конструктивні недоліки окремого вузла чи машини та інші;

- спонукають працюючого допускати помилки у процесі праці (конструктивна недосконалість технологічного процесу роботи машин або самої машини чи певного обладнання), низька кваліфікація працюючого та

рівень знань з охорони праці, відсутність відповідного контролю за дотриманням правил з охорони праці;

- створюють можливість проникнення працюючого у небезпечну зону (відсутність огорожень небезпечної зони і сигналізації про наближення до небезпечної зони, неправильна організація робочого місця та інші);

- призводять до виникнення інших небезпечних умов (помилки у монтажі роторів, що обертаються, деякі конструктивні недоліки);

- безпосередньо призводять до травмонебезпечної ситуації (наявність плям масла на підлозі, неправильно організоване робоче місце, не обґрунтовані режими роботи обладнання та інші);

- призводять до виникнення небезпечних дій (низький рівень професійної підготовки й організації навчання з охорони праці, відсутність або неефективність контролю з охорони праці та інші). Небезпечні обставини розпізнаються аналогічно звичайним обставинам, на що вказує та чи інша обставина. Небезпечні обставини розкривають дії, стан чи ознаки небезпечного фактора і обстановку, при якій він діяв на людину. Якщо внаслідок аварії технічної системи виникли травми у людей, то сам випадок травми необхідно розглядати як подію, що є наслідком аварії. Це стосується тих систем, у яких підсистемами одночасно є машина (технічний засіб) і людина [3].

5.2. Моделювання виникнення травм та аварій

На даний час методикою оцінки рівня безпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію (показника) рівня безпеки для конкретного об'єкта. Таким показником вибрана ймовірність виникнення аварії, травми або катастрофи залежно від досліджуваного явища.

З метою запровадження оцінки рівня небезпеки певного об'єкта чи явища на виробництві, необхідно застосувати простий і доступний метод обчислення значень ймовірності будь-якого випадкового явища. Основні принципи цього методу полягають у тому, що на основі обстеження робочого місця чи окремої машини (об'єкта) виявляють виробничі небезпеки, можливі аварійні або травмонебезпечні ситуації. Для оцінки ситуацій визначають події, які можуть стати головною подією при побудові логіко-імітаційної моделі аварії або травми (чи катастрофи). Після цього будують модель («дерево відказів і помилок оператора»). При цьому важливе значення має правильний вибір головної випадкової події.

Після вибору головного випадкового явища (події) розпочинають побудову моделі («дерева») [3]. Використовуючи оператори «І» та «АБО», виконують набір ситуацій (відомих до цього), які можуть призвести до тієї події, яка вибрана як головна. Наприклад, під час розточування гільз в блоці циліндрів двигуна, небезпечним явищем цього буде травмування робітника різцем або намотування на обертові частини верстата частини одягу. Отже, приймаємо подію «травма» її як головну зв'язують з наступною подією шляхом логічного аналізу. Після визначення відповідних аварійних, травмонебезпечних або катастрофічних ситуацій та їх кількості, визначаємо інші події, що входять до кожної такої ситуації, логічним аналізом із застосуванням операторів «І», «АБО» та інших. Процес побудови моделі триває поки не будуть знайдені усі базові події, що визначають межу моделі.

Будь-яка логіко-імітаційна модель як правило характеризується із застосуванням різних символів тієї чи іншої події, яка першою чергою бере свій початок з головної події, а наступні розміщуються після неї зверху вниз, аж до базових подій [3].

Основні принципи побудови моделі такі: вивчається виробництво, на якому мали місце раніше або можуть мати місце аварії та виробничі травми.

5.3. Розробка логічно-імітаційної моделі травм на виробництві

В процесі створення логіко-імітаційних моделей застосовують різні символи, які характеризують ті чи інші події. За звичай, побудова моделі розпочинається з головної події, а наступні розміщують зверху вниз, аж до базових подій (рис. 5.1) [3].

На схемі кожен блок, позначений відповідним номером, та означає подію (у загальному вигляді) або окремий етап побудови моделі [3]:

- 1 – відмова (аварія, травма) системи – головна подія;
- 2 – послідовність подій, що призводять до відмови системи;
- 3 – послідовність подій зображується за допомогою логічних операторів “І”, “АБО” та інших;
- 4 – усі вхідні і вихідні події, що входять до моделі, зображуються у вигляді прямокутників з відповідними написами всередині;
- 5 – послідовний підхід до базових подій, частоти виникнення яких відомі;

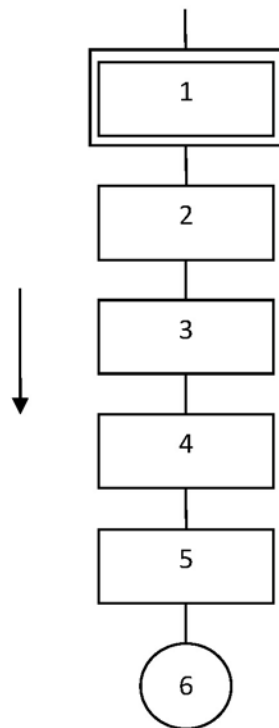


Рисунок 5.1 – Схема основних принципів побудови логіко-імітаційних моделей: 1 – головна подія; 2...5 – проміжні події; 6 – базова подія

6 – базові події зображують у вигляді у вигляді кружечків із написами всередині, вони є межею аналізу побудованої моделі (“дерева помилок”).

Кожну із подій моделі (“розкрита”, “не розкрита”, “головна”, “базова”, “подія-умова” тощо) зображують у вигляді символів: коло – базова подія з відповідними числовими даними; ромб – нерозкрита подія (подія, яка вимагає проведення відповідних досліджень); прямокутник – подія, що виникає як результат дії символа-оператора; овал – подія-умова, що використовується з оператором

“Заборона”; хатка (п’ятикутник, в якого один з боків є основою), – подія, яка може відбутися або не відбутися; трикутник (рівносторонній трикутник) – символ перенесення.

Як приклад відобразимо процес розробки методики логічно-імітаційної моделі. Головну випадкову подію, модель якої нам необхідно побудувати, вибираємо виходячи з оцінки відповідного об’єкта, виробництва чи окремої одиниці обладнання і змісту його найбільш небезпечного явища, яке за певних умов виробництва може виникнути. Вибором головної події розпочинають побудову моделі. Використовуємо оператори «І» та «АБО» – виступають у ролі набору ситуацій, які можуть призвести до тієї події, яка вибрана як головна [7].

Також слід зазначити, що кожна випадкова подія, до якої входять базові події, може формуватися й виникати при входженні у неї двох, трьох і більше базових подій за допомогою відповідних операторів.

Після побудови та перевірки, модель підлягає математичному опрацюванню для визначення ймовірності кожної випадкової події, що увійшла до моделі, починаючи з базових і закінчуючи головною.

Ймовірності базових подій визначають за даними виробництва. Наприклад, базова подія «стан контролю з охорони праці». Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об’єкті. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 50 або 30 %, то ймовірність відповідно дорівнює 0,5 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність «не здійснення контролю» становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0.

Після обчислення ймовірності всіх подій, розміщених у ромбах, і базових подій, починаючи з лівої нижньої гілки «дерева», позначають номерами всі випадкові події, що увійшли до моделі.

На цьому можна вважати, що певна модель підготовлена до математичної обробки. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують формули [3].

Побудуємо логіко-імітаційну модель процесу, формування і виникнення аварії та травми в процесі відновлення деталей подрібнюючих машин і складемо перелік базових подій. Кожній події (пункту) присвоюємо певне значення ймовірності його виникнення:

- | | |
|---|---------------|
| 1. Відсутність елементів системи | $P_6 = 0,19;$ |
| 2. Професійний рівень слюсаря | $P_1 = 0,25;$ |
| 3. Наявність дефектів | $P_8 = 0,15;$ |
| 4. Відсутність захистів | $P_7 = 0,13;$ |
| 5. Досвід роботи сервісного інженера | $P_2 = 0,18;$ |
| 6. Пошкодження елементів системи | $P_5 = 0,15;$ |
| 7. Психо-фізіологічний стан сервісного інженера | $P_3 = 0,13;$ |

Складені події дають можливість побудувати матрицю логічних взаємозв'язків між окремими пунктами.

Отже, розглядаємо травмонебезпечну ситуацію, яка може виникнути під час миття деталей двигуна та призвести до травмування працівника, а також зробимо розрахунок ймовірності виникнення подій, що формують логіко-імітаційну модель в процесі технічного сервісу машин .

Ймовірність виникнення події P_9 визначаємо наступним чином:

$$P_9 = 0,25 + 0,18 + 0,13 = 0,56;$$

Ймовірність виникнення події P_{10} визначаємо:

$$P_{10} = 0,19 \cdot 0,15 = 0,0285$$

Ймовірність виникнення події P_{11} визначаємо так:

$$P_{11} = 0,13 + 0,15 = 0,28;$$

Ймовірність події P_{12} :

$$P_{12} = (0,25 + 0,18 + 0,13) \cdot 0,18 = 0,1008;$$

Ймовірність події P_2 :

$$P_2 = 0,1008 \cdot 0,0285 \cdot 0,28 = 0,000804;$$

За нашими розрахунками ймовірність виникнення травми працівника під час миття деталей дигуна є досить мала і становить $P_2 = 0,000804$.

Впровадження у практику підприємства логіко-імітаційних моделей дослідження аварій і травм, а також для обґрунтування заходів охорони праці, дають змогу знизити ймовірність виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій.

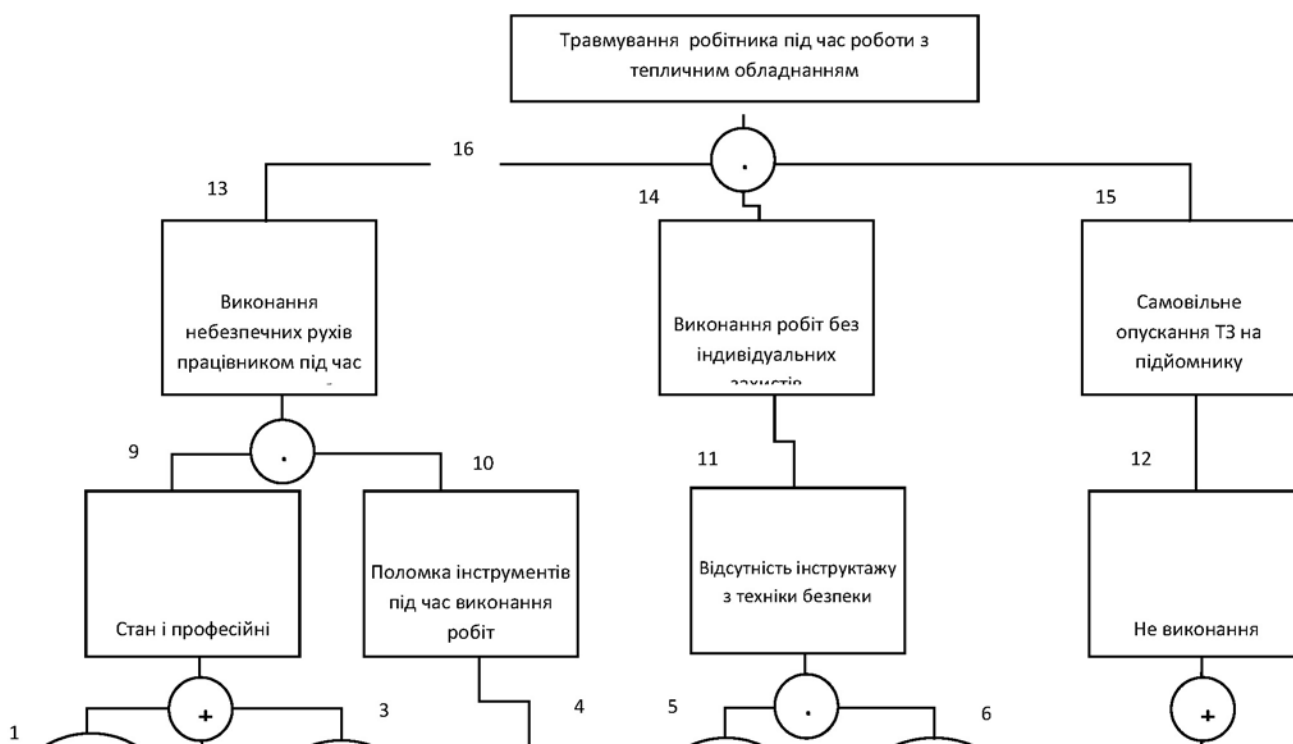


Рисунок 5.2 – Матриця логічних взаємозв'язків між окремими подіями травмонебезпечної ситуації

5.4. Безпека в надзвичайних ситуаціях

В залежності від ефективності розроблення та особливо від впровадження у практику заходів із запобігання та ліквідації надзвичайної ситуації в разі її виникнення залежатиме життя та здоров'я персоналу та відвідувачів підприємств і розміри заподіяної шкоди [3].

Відповідно до Кодексу цивільного захисту України, підготовка персоналу на підприємствах незалежно від форм власності до дій у надзвичайних ситуаціях здійснюється за спеціально розробленою схемою заходів захисту населення та територій.

Виходячи з цього, ст.130 Кодексу цивільного захисту України передбачає, що на підприємствах з чисельністю персоналу 50 осіб і менше розробляються та затверджуються інструкції щодо дій при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій [3].

Крім того, у сфері промислового виробництва до малих підприємств можуть бути віднесені і такі, де чисельність працівників перевищує 50 осіб. Інструкції для таких підприємств розроблюються за рішенням відповідного територіального органу Держслужби України з надзвичайних ситуацій.

Розроблена інструкція не повинна суперечити положенням та вимогам Кодексу цивільного захисту України.

Інструкція розробляється та підписується посадовою особою підприємства з питань цивільного захисту, затверджується керівником підприємства та доводиться до всіх працівників під підпис.

Крім інструкції, на малому підприємстві розробляється План евакуації при пожежі або загрозі вибуху. Особливо це важливо для тих об'єктів, на території яких може знаходитись значна кількість відвідувачів.

Деякі конкретні заходи, не відображені в нормативних документах підприємства, потребують внесення до посадових інструкцій працівників. Крім того, на малому підприємстві необхідно розробляти й доводити до всіх працівників “Порядок цілодобового оповіщення керівництва та працівників у випадку загрози або виникнення надзвичайної ситуації” [3].

Всі працівники підприємства повинні бути навчені діям, чітко знати свої обов'язки та неухильно їх виконувати. Це також стосується адміністрації

малого підприємства, яка в екстремальній обстановці не може приймати помилкові рішення або віддавати необґрунтовані розпорядження.

Уникнути цього дозволить якісно розроблена “Інструкція щодо дій персоналу малого підприємства при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Resh, H. M. Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower [Text] / H. M. Resh. – 8th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2022. – 584 p.
2. Barbosa, G. L. Sustainable Food Production in Controlled Environments: Hydroponics, Aquaponics, and Vertical Farming [Text] / G. L. Barbosa, F. D. A. Almeida Gadelha. – Amsterdam: Elsevier, 2023. – 412 p.
3. Nazaruk, M. Energy Resilience in Agricultural Systems: Concepts, Design, and Case Studies [Text] / M. Nazaruk, S. G. Jones. – Berlin: Springer, 2021. – 298 p.
4. Huggins, T. Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials: Fundamentals and Applications [Text] / T. Huggins. – 2nd ed. – Cham: Springer, 2022. – 327 p.
5. Resh, H. M. (2022). Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower. CRC Press.
6. Carotti, L., et al. (2021). "Root zone hypoxia and plant responses in soilless culture: A review." *Scientia Horticulturae*, 289, 110499.
7. Taiz, L., Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates.432423
8. Основи гідропоніки. URL: // <https://shop.floragrowing.com/ua/a360402-gidroponika.html>42342
9. Глосарій термінів з хімії / укладачі: Й. Опейда, О. Швайка ; Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. — Донецьк : Вебер, 2008. — 738 с. — ISBN 978-966-335-206-0.55
10. Калініченко, В. О. Гідропонні та аеропонні системи вирощування рослин: принципи побудови та перспективи розвитку // Наукові праці НУБіП України. — 2022. — №4. — С. 35–42.

11. Nguyen, D. T., & Lee, J. H. Development of an intelligent aeroponic system using IoT and machine learning // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2021. — Vol. 187. — Article 106252.
12. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106252.
13. Islam, M. J., Rahman, M. M., & Hasan, M. R. Design and Implementation of an Automated Aeroponic System for Smart Agriculture // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. — 2020. — Vol. 11, No. 5. — P. 215–222.
14. He, C., Li, X., & Zhang, Q. Optimization of nutrient misting intervals in aeroponics for lettuce growth // *Journal of Plant Nutrition*. — 2022. — Vol. 45(12). — P. 1762–1773.
15. Luna-Morales, C., & Ortega, R. Energy-efficient control strategies for aeroponic nutrient delivery systems // *Biosystems Engineering*. — 2023. — Vol. 228. — P. 151–163.
16. Барна, О. І., Мельник, С. Г. Автоматизація мікроклімату в установках аеропонного типу // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. — 2021. — №5. — С. 48–53.
17. Al-Kodmany, K. Vertical Farming: Aeroponic and Hydroponic Technologies for Sustainable Urban Food Systems // *Sustainability*. — 2018. — Vol. 10(11). — Article 3770.
18. DOI: 10.3390/su10113770.
19. Шевченко, І. П. Мікроконтролерні системи моніторингу параметрів середовища в аеропонних установках // *Молодий вчений*. — 2022. — №3(103). — С. 112–117.
20. Bhattarai, S. P., Midmore, D. J. Aeroponics: A modern approach for vegetable seed production // *Horticultural Science (Prague)*. — 2020. — Vol. 47(1). — P. 1–11.
21. Тарасенко, Ю. М. Системи автоматизованого керування подачею живильного туману в аеропонних установках // *Енергетика та автоматика*. — 2021. — №4. — С. 59–65.

22. Resh, H. M. *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. — 8th ed. — CRC Press, 2022. — 574 p.
23. Li, J., Zhang, X., & Zhao, H. Simulation of air–nutrient interactions in high-pressure aeroponic systems // *Journal of Agricultural Engineering Research*. — 2024. — Vol. 109. — P. 89–98.
24. Коваленко, Р. В. Енергоєфективність системи туманоутворення в установках аеропонного типу // *Сучасні технології в аграрному виробництві*. — 2023. — №2. — С. 41–47.
25. Pandey, R., & Singh, A. Sensor-based control in aeroponic systems for precision nutrient delivery // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21(19). — Article 6542.
26. Choudhary, N., & Kumar, R. IoT-based monitoring and data analytics in aeroponics // *IEEE Access*. — 2023. — Vol. 11. — P. 17654–17666.78878
27. Hwang, J.-Y., et al. (2017). "Na-ion batteries: from fundamental research to engineering exploration." *Energy Storage Materials*, 6, 1-10.
28. Cabeza, L. F. (2021). *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications* (2nd ed.). Woodhead Publishing.55
29. N'Tsoukpoe, K. E., et al. (2009). "A review on long-term sorption solar energy storage." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2385-2396.
30. Ремонт машин та обладнання. Підручник. За редакцією О.І. Сідашенка та О.І. Науменка. Харків 2010.
31. Лауш П. В. Ремонт сільськогосподарської техніки (курсове і дипломне проектування): Навч. посібник / П. В. Лауш, Н. П. Лауш, Т. П. Лесюк. – Кіровоград : ПОЛІМЕД-Сервіс, 2005.
32. Основи наукових досліджень. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт №2 і №3 для студентів факультету механізації сільського господарства. Львів. 1998.
33. Охорона праці. Методичні рекомендації до виконання розділу з охорони праці у дипломних проектах. Львівський національний аграрний університет, 2012 р.

34. Awad S.B. (2011) High-Power Ultrasound in Surface Cleaning and Decontamination. In: Feng H., Barbosa-Canovas G., Weiss J. (eds) Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. Food Engineering Series. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_21
35. . F.J. Fuchs. Ultrasonic Cleaning Fundamental Theory and Application. New York Applications Engineering, Blackstone-Ney Ultrasonics Inc., 2002.
36. . Ремонт машин. Методичні поради до курсового і дипломного проектування: у 2-х частинах/ За аг. Ред.. академіка О.Д. Семковича. – Частина 1 та 2. Львів : Львів. держ. агр. ун-т, 1997.
37. Dem'yanushko, I.V., Kazantsev, V.F., Karagodin, V.I. et al. Tools for Ultrasound Cleaning. Russ. Engin. Res. 37, (2017).
38. T.J. Mason, Ultrasonic cleaning: an historical perspective, Ultrason. Sonochem. (2016).
39. Стеблюк М.І. Цивільна оборона. Київ: Урожай. 1994.
40. Барковський В.В., Барковська Н.В., Лопатін О.К. Теорія ймовірностей та математична статистика. м. Київ Видавництво “Центр учбової літератури”, 2009.
41. . Хітров І.О., Гавриш В.С. Ремонт машин і обладнання. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2012.
42. Кармазін В.В., Семенець В.В, Курс загальної фізики. М Київ Видавничий дім "КОНДОР" 2016.
43. B.Verhaagen, D.F. Rivas. Measuring cavitation and its cleaning effect. Ultrason. Sonochem. 29 (2016).