

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система керування енергоспоживанням теплиці на основі  
сенсорних даних  
Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 022099.22.02.37 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група КІ2-22-2

  
Підпис

Валентин ТИМІНСЬКИЙ  
Ініціали, прізвище

Керівник ст. викладач  
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Василь СТЕЦЮК  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доц.  
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС  
«11» червня 2026 р.

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

дата

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

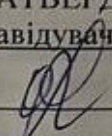
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС

 Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Тиміньському Валентину Миколайовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система керування енергоспоживанням теплиці на основі сенсорних даних

Керівник проекту (роботи) Стецюк Василь Миколайович, ст. викладач.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Дослідження методів та засобів моніторингу і керування мікрокліматом теплиці проектування та алгоритмічне забезпечення кіберфізичної системи

Проектування та алгоритмічне забезпечення кіберфізичної системи

Експериментальне дослідження та аналіз результатів роботи КФС

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

Інтерфейс користувача програми

Блок-схема Алгоритм роботи та контролю виконавчих механізмів

КФС

Блок-схема Алгоритм роботи модуля імітаційного моделювання, діагностики та фінансового прогнозування

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження методів та засобів моніторингу і керування мікрокліматом теплиці	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – проектування та алгоритмічне забезпечення кіберфізичної системи	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – експериментальне дослідження та аналіз результатів роботи КФС	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач Т.В.м  
Підпис

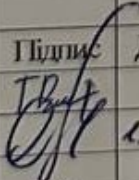
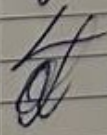
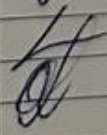
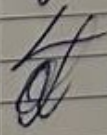
Валентин ТИМІНСЬКИЙ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

В.С.  
Підпис

Василь СТЕЦОК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	№ екз	Примітка
			<u>Текстові документи</u>			
1		КвРКІ 022099.22.02.37 ПЗ	Пояснювальна записка	68		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КвРКІ 022099.22.02.37 Е8	Інтерфейс користувача програми	1		
3		КвРКІ 022099.22.02.37 Е8	Блок схема алгоритм роботи та контролю виконавчих механізмів	1		
4		КвРКІ 022099.22.02.37 Е8	Блок-схема роботи Алгоритм роботи модуля , імітаційного моделювання діагностики та фінансового прогнозування	1		

КвРКІ 022099.22.02.37 ВП				
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата
Розробив		Тимінський		
Перевір.		Стешок		1.6.20
Н. контр.		Кисіль		01.06
Зав.		Павлова		
Відомість проекту			Літера	Аркуш
			У	1
			ХНУ, КІ2-22-2	

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система керування енергоспоживанням теплиці на основі сенсорних даних».

Автор роботи: Валентин ТИМІНСЬКИЙ.

Керівник роботи: Василь СТЕЦЮК.

Пояснювальна записка: 68 с., 21 рис., 4 табл., 3 дод., 45 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

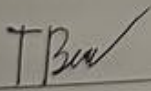
АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МІКРОКЛІМАТ, ТЕПЛИЦЯ, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, IDS..

Метою дипломної роботи є розробка кіберфізичної системи для оптимізації енергоспоживання теплиці шляхом інтеграції фізичних процесів середовища з інтелектуальними алгоритмами керування та модулями кібербезпеки.

Об'єктом дослідження є процеси підтримки мікроклімату та споживання енергії в автоматизованих теплицях.

Предметом дослідження є архітектура, алгоритми керування температурним режимом та методи захисту сенсорних даних у складі кіберфізичної системи.

Під час дослідження використано методи об'єктно-орієнтованого проектування, концепцію цифрових двійників (Digital Twin) та математичне моделювання теплових процесів. Розроблено програмний симулятор на базі JavaScript, який дозволяє досліджувати поведінку системи при різних сценаріях, включаючи кібератаки на сенсори. Особливу увагу приділено енергоефективності алгоритмів з гістерезисом та впровадженню системи виявлення вторгнень (IDS).

  
Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Дослідження методів та засобів моніторингу і керування мікрокліматом теплиці.....	7
1.1 Фізико-технічні основи формування мікроклімату та аналіз процесів теплообміну в замкненому ґрунті.....	7
1.2 Класифікація параметрів мікроклімату та сучасні методи моніторингу стану середовища.....	9
1.3 Аналіз апаратно-програмних засобів реалізації моніторингу та керування.....	12
1.4 Аналіз існуючих технічних рішень та їх обмежень.....	15
1.5 Сутність кіберфізичних систем у керуванні технічними об'єктами.....	17
1.6 Висновки до першого розділу.....	20
2 Проектування та алгоритмічне забезпечення кіберфізичної системи.....	22
2.1 Формування архітектури системи та логіки взаємодії компонентів.....	22
2.2 Алгоритмічне забезпечення кіберфізичної системи керування мікрокліматом.....	24
2.3 Пропорційно-інтегрально-диференціальне регулювання у задачі стабілізації температурного режиму теплиці.....	26
2.4 Обґрунтування вибору програмних засобів розробки та засобів візуалізації.....	29
2.5 Модуль діагностики, шаблонізації та прогнозування енергетичних витрат.....	32
2.6 Алгоритм діагностики та симуляція добового циклу.....	33
2.7 Економічний аналіз та фінансове прогнозування.....	34
2.8 Механізм виявлення аномалій та запобігання перевитратам.....	35

КвРКІ. 022099.22.02.37 ПЗ							
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис/Дата	Кіберфізична система керування енергоспоживанням теплиці на основі сенсорних даних. Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Валентин ТИМІНСЬКИЙ			у		
Перевір.		Василь СТЕЦОК				2	72
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ			ХНУ КІ2-22-2		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА					

2.9	Оптимізація налаштувань на основі результатів симуляції.....	36
2.9.1	Програмно-апаратна реалізація інтерфейсу управління та моніторингу.....	37
2.9.2.	Інтеграція шаблонів вирощування.....	37
2.9.3.	Діагностика витрат та прогнозування ресурсів.....	38
2.10	Висновки до другого розділу.....	41
3	Експериментальне дослідження та аналіз результатів роботи кфс..	43
3.1	Опис програмного інтерфейсу користувача (GUI).....	43
3.2	Моделювання апаратної конфігурації та принципів «цифрового двійника» .....	46
3.3	Аналіз динаміки перехідних процесів та ПІД-стабілізації параметрів .....	49
3.4	Дослідження інтелектуальних модулів прогнозування та захисту від кіберзагроз .....	54
3.4.1	Аналіз ефективності нейромережевого прогнозування.....	54
3.4.2	Тестування стійкості до кіберфізичних атак.....	55
3.5	Аналіз енергетичних показників та автоматизація звітності кіберфізичної системи .....	57
3.5.1	Моніторинг енергоспоживання у режимі розумної енергетичної мережі.....	57
3.5.2	Автоматизація формування технічних звітів та аналіз методів експорту .....	59
3.5.3	Комп'ютерний зір та аналіз стану біологічних об'єктів (Plant Vision) .....	61
3.5.4	Статистичний аналіз логів телеметрії та верифікація даних .....	62
3.5.5	Дослідження відмовостійкості та аналіз аварійних сценаріїв.....	63
3.5.6	Специфікація розгортання програмного забезпечення та конфігурація середовища .....	66
3.6	Висновки до третього розділу.....	70

Висновки.....	72
Перелік джерел посилань.....	74
Додаток А Копія креслення «Інтерфейс користувача програми» .....	79
Додаток Б Копія креслення «Алгоритм роботи та контролю виконавчих механізмів КФС» .....	80
Додаток В Копія креслення «Алгоритм роботи модуля імітаційного моделювання, діагностики та фінансового прогнозування ».....	81

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## ВСТУП

Модернізація агропромислового комплексу передбачає впровадження систем автоматизації в межах концепції розумного сільського господарства. Специфіка керування тепличними господарствами полягає в необхідності забезпечення оптимальних умов для вегетації рослин за умови раціонального використання енергоресурсів. З огляду на вартість енергоносіїв, мінімізація витрат на опалення та вентиляцію зі збереженням показників урожайності є актуальним науково-прикладним завданням.

Класичні підходи до автоматизації теплиць на базі релейних схем або програмованих логічних контролерів із жорсткою логікою характеризуються недостатньою гнучкістю, оскільки не повною мірою враховують теплову інерцію об'єкта керування та вплив зовнішніх збурень. Вирішення цієї проблеми вбачається у застосуванні концепції кіберфізичних систем. Використання технології цифрових двійників забезпечує можливість прогнозування динаміки системи, верифікації алгоритмів у віртуальному середовищі та реалізації багаторівневого захисту інформації. Такий підхід підвищує енергоефективність та стійкість системи до кіберзагроз, що є необхідною умовою функціонування сучасних агропідприємств.

Мета дослідження полягає у розробленні та дослідженні кіберфізичної системи керування мікрокліматом теплиці, яка завдяки інтеграції фізичних моделей середовища та модулів виявлення аномалій забезпечує оптимізацію енергоспоживання з дотриманням технологічних регламентів.

Для досягнення зазначеної мети виконано комплекс завдань, що охоплює аналіз динаміки теплофізичних процесів усередині теплиці з ідентифікацією ключових вузлів енерговитрат, а також порівняльний аналіз наявних рішень автоматизації з обґрунтуванням доцільності впровадження кіберфізичного підходу. У межах роботи сформовано архітектурну модель системи, яка поєднує рівні збору даних, обробки сигналів та візуального моніторингу. Крім того,

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснено розроблення енергоефективних алгоритмів керування на основі принципів гістерезису з адаптивною корекцією відповідно до зовнішніх умов, реалізовано програмний модуль виявлення вторгнень для ідентифікації маніпуляцій із показниками сенсорів у режимі реального часу, а також перевірено працездатність системи за допомогою розробленого програмного симулятора з подальшим оцінюванням отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси підтримання параметрів мікроклімату та структура енергоспоживання в умовах закритого ґрунту.

Предмет дослідження становлять структура, програмно-алгоритмічне забезпечення та методи захисту даних у складі кіберфізичної системи керування теплицею.

Методологічну основу роботи формують методи об'єктно-орієнтованого аналізу, теорія автоматичного керування, методи математичного моделювання фізичних систем та підходи до виявлення аномалій у часових рядах даних.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

# 1 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ І КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЦІ

1.1 Фізико-технічні основи формування мікроклімату та аналіз процесів теплообміну в замкненому ґрунті

Мікроклімат теплиці є сукупністю фізичних параметрів повітря та ґрунту, серед яких ключовими є температура, вологість і концентрація газів, що безпосередньо впливають на біологічні процеси вегетації. Споруди закритого ґрунту забезпечують можливість штучного моделювання умов, відмінних від зовнішніх атмосферних показників, що дозволяє здійснювати вирощування сільськогосподарських культур незалежно від сезонних факторів.

Теплиця як об'єкт керування характеризується безперервною термодинамічною взаємодією із зовнішнім середовищем, що детально відображено на схемі теплових потоків та енергетичного обміну (рис. 1.1). Сонячна радіація, проникаючи всередину через світлопрозорі огорожувальні конструкції, поглинається ґрунтом і рослинами та трансформується у теплову енергію. Оскільки матеріали покриття мають низьку пропускну здатність для довгохвильового теплового випромінювання, всередині формується парниковий ефект. Внаслідок цього, навіть за умов низьких температур навколишнього середовища, відбувається значне акумулювання теплової енергії в об'ємі споруди.

З позицій теорії керування, теплиця є нестационарною багатозв'язною системою, фізичні параметри якої постійно прагнуть до термодинамічної рівноваги із зовнішнім середовищем. Регулювання мікроклімату забезпечується інженерно-технічними комплексами, що включають системи опалення, вентиляції та зволоження. Процес підтримання заданих параметрів ускладнюється постійними тепловтратами через теплопередачу огорожувальних конструкцій, дифузію вологи та інфільтрацію зовнішнього повітря. Відповідно, без активного керування внутрішня температура

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експоненційно наближається до температурних показників зовнішнього середовища.

Динаміка зміни температурного режиму в теплиці має нелінійний характер та відзначається значною тепловою інерційністю. Нагрівання внутрішнього простору відбувається поступово внаслідок конвективного теплообміну між нагрівальними елементами, повітряними масами та ґрунтом. Аналогічно, після припинення роботи системи опалення, об'єкт зберігає залишкову теплову енергію завдяки її попередньому накопиченню. Високий рівень інерційності є ключовою проблемою під час розроблення систем автоматичного керування. Застосування найпростіших алгоритмів двопозиційного регулювання призводить до ефекту перерегулювання системи – перевищення заданих значень температурного оптимуму внаслідок віддачі накопиченого тепла, що, у свою чергу, спричиняє нераціональні витрати енергоресурсів.

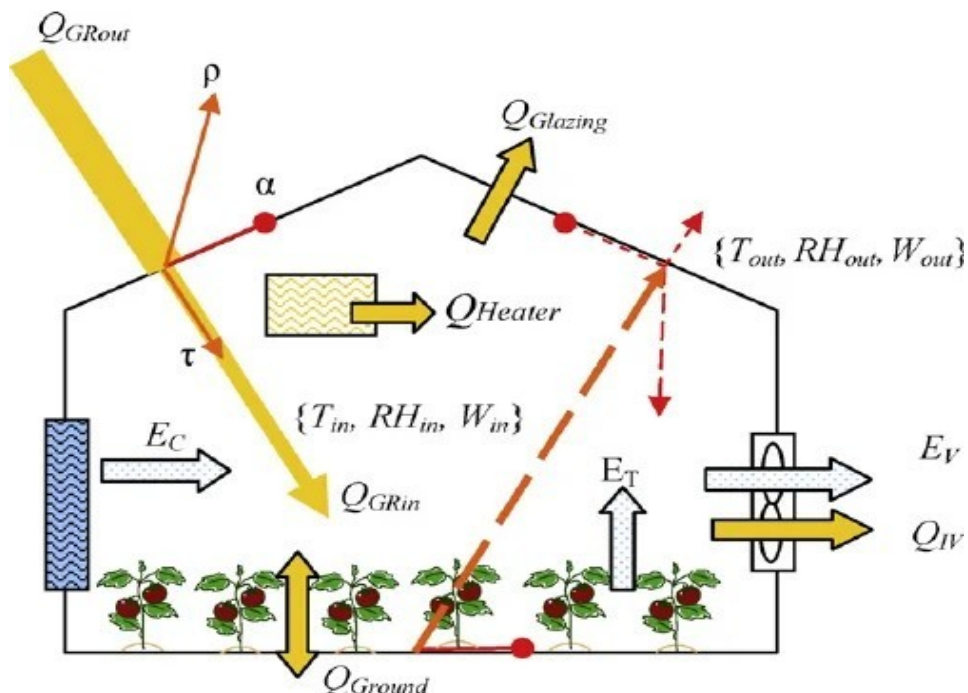


Рисунок 1.1 – Схема теплових потоків та енергетичного обміну в теплиці [32]

Для ефективного підтримання заданих параметрів і мінімізації енергоспоживання система керування має базуватися на предиктивних моделях динаміки об'єкта, а не обмежуватися реакцією на поточні відхилення. Раптові зміни зовнішніх метеорологічних умов або активація систем вентиляції призводять до порушення енергетичного балансу, що вимагає своєчасного та адекватного керуючого впливу на виконавчі механізми. Сучасним етапом розвитку автоматизації є перехід від ручного або релейного керування до впровадження кіберфізичних систем [15]. У таких комплексах мікроконтролерне обладнання здійснює безперервний збір даних із сенсорної мережі та зіставляє їх із математичною моделлю цифрового двійника [21]. Це забезпечує активацію виконавчих механізмів виключно на проміжок часу, необхідний для відновлення термодинамічної рівноваги.

Отже, синтез системи керування мікрокліматом потребує комплексного врахування закономірностей тепломасообміну, швидкості дисипації теплової енергії у замкненому просторі та алгоритмічних методів мінімізації цих втрат. Завдання полягає у математичній формалізації зазначених фізичних процесів із їх подальшою програмною реалізацією, що забезпечить прогнозування швидкості охолодження об'єкта та предиктивне увімкнення систем опалення. Такий кіберфізичний підхід дозволяє раціоналізувати використання енергоресурсів, знизити інтенсивність зношування обладнання та підвищити рівень автономності технологічних процесів у тепличному господарстві.

## 1.2 Класифікація параметрів мікроклімату та сучасні методи моніторингу стану середовища

Розроблення ефективної кіберфізичної системи з метою оптимізації енергоспоживання потребує чіткої класифікації фізичних параметрів моніторингу. Керування мікрокліматом у сучасних теплицях є багатовимірною задачею, оскільки енергоефективність визначається комплексом

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

взаємопов'язаних чинників, кожен з яких характеризується специфічною інерційністю та ступенем впливу на загальний тепловий баланс об'єкта.

Базовим параметром контролю є просторовий розподіл температури повітря. З огляду на наявність зон інфільтрації холодного повітря поблизу огорожувальних конструкцій та зон перегріву у верхній частині споруди, система моніторингу має бути просторово-розподіленою. Це реалізується за рахунок розгортання мережі цифрових сенсорів із передачею даних у режимі реального часу [39]. Аналіз просторових температурних градієнтів забезпечує формування керуючих впливів для локального ввімкнення нагрівальних елементів або циркуляційних вентиляторів [32], що мінімізує нецільові витрати теплової енергії.

Наступним важливим фактором є відносна вологість повітря та вологість ґрунтового субстрату. Ці показники безпосередньо впливають на інтенсивність транспірації рослин, а в термодинамічному аспекті — на теплоємність повітряних мас. Перевищення допустимих значень вологості зумовлює необхідність інтенсифікації повітрообміну для запобігання утворенню конденсату, що неминуче супроводжується додатковими тепловтратами. Відповідно, алгоритми моніторингу вологості інтегруються в загальний контур керування мікрокліматом для комплексного аналізу психрометричних параметрів та розрахунку температури точки роси.

Окремим завданням моніторингу є контроль концентрації діоксиду вуглецю та рівня інсоляції, які виступають визначальними факторами інтенсивності фотосинтезу. За умов недостатньої освітленості підтримання високого температурного фону є енергетично нераціональним через уповільнення метаболічних процесів у рослинах. З огляду на це, алгоритмічне забезпечення кіберфізичної системи має базуватися на стратегії адаптивного енергоспоживання, яка передбачає динамічну корекцію температурних уставок залежно від поточного рівня освітленості (зокрема, у нічний час або за умов значної хмарності). Для систематизації методів керування зазначеними

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багатозв'язними процесами доцільно проаналізувати класифікацію існуючих стратегій автоматизації (рис. 1.2).

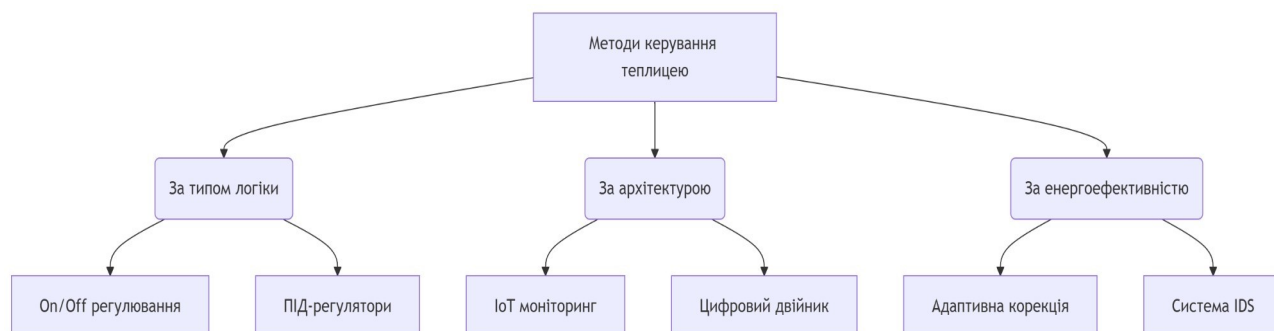


Рисунок 1.2 - Блок-схема класифікації стратегій керування мікрокліматом та методів енергозбереження

Відповідно до класифікації, наведеної на рисунку 1.2, методи керування мікрокліматом еволюціонували від базових дискретних систем до багаторівневих інтелектуальних архітектур. Традиційні методи, зокрема двопозиційне регулювання, попри простоту апаратної реалізації, спричиняють значні коливання керованих величин та ефект перерегулювання, що призводить до перевитрати енергоносіїв на рівні до 30 % [24]. Застосування пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів частково нівелює цю проблему, проте їх параметричне налаштування суттєво ускладнюється за умов інтенсивних зовнішніх збурень, таких як різкі градієнти температур або вітрові навантаження [18].

У контексті цього дослідження найбільш обґрунтованим є застосування концепції кіберфізичних систем. Специфіка такого підходу полягає у використанні обчислювального модуля, алгоритми якого базуються не лише на поточних показах сенсорної мережі, але й на динамічній математичній моделі об'єкта керування. Це забезпечує можливість впровадження методів предиктивного керування для формування випереджувальних керуючих впливів. Як приклад, алгоритмічне забезпечення здатне завчасно знижувати потужність

систем опалення з урахуванням прогнозованого підвищення рівня природної інсоляції у вранішні години.

Застосування такого комплексного підходу до моніторингу та регулювання мікроклімату є основою для побудови енергоефективних тепличних комплексів із високим рівнем автономності та мінімізацією втручання оператора.

### 1.3 Аналіз апаратно-програмних засобів реалізації моніторингу та керування

Обґрунтування апаратно-програмного забезпечення для кіберфізичної системи керування мікрокліматом є визначальним етапом проектування, оскільки достовірність вхідних даних безпосередньо впливає на ефективність алгоритмів енергозбереження. За результатами досліджень, проведених під час переддипломної практики, встановлено доцільність застосування розподіленої архітектури на базі мікроконтролерів із низьким енергоспоживанням та цифрових сенсорних вузлів [28]. Запропонований підхід забезпечує можливість інтеграції програмного ядра, розробленого з використанням вебтехнологій та JavaScript, що гарантує високу швидкість обробки телеметричних даних та імплементацію багаторівневих сценаріїв захисту інформації [3].

Як базовий вимірювальний елемент обрано цифровий модуль температури та вологості DHT22 [8]. Конструктивна особливість цього сенсора полягає у використанні ємнісного датчика вологості та прецизійного термістора, поєднаних із восьмибітним мікроконтролером для генерування каліброваного цифрового сигналу. Застосування цифрового інтерфейсу дозволяє нівелювати спотворення даних, притаманні аналоговим лініям зв'язку за умов значної довжини кабельних трас у тепличних комплексах. Висока роздільна здатність сенсорного вузла забезпечує точне регулювання параметрів опалення,

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запобігаючи непередбачуваним температурним коливанням, що негативно позначаються на енергетичному балансі об'єкта та вегетативних процесах.

Контроль газового складу середовища реалізовано на базі датчика концентрації діоксиду вуглецю серії МН-Z19В. Принцип дії пристрою ґрунтується на методі недисперсійної інфрачервоної фотометрії, що забезпечує високу стабільність метрологічних характеристик та стійкість до впливу вологого середовища. Результати досліджень підтверджують, що імплементація цього сенсора дозволяє реалізувати алгоритм адаптивного повітрообміну, за якого активація виконавчих механізмів вентиляції здійснюється виключно у разі перевищення гранично допустимих концентрацій діоксиду вуглецю. Такий підхід суттєво зменшує частоту відкривання вентиляційних фрамуг у холодний період року, мінімізуючи втрати акумульованої теплової енергії та знижуючи навантаження на систему опалення. У підсумку це дозволяє досягти оптимального балансу між підтриманням інтенсивності фотосинтезу та загальною енергоефективністю об'єкта.

Важливим компонентом розробленої системи є інтерактивна графічна модель, реалізована з використанням технології масштабованої векторної графіки [2]. Програмний модуль забезпечує оператору візуальний моніторинг термодинамічних процесів в об'єкті керування паралельно з аналізом числових масивів телеметрії. На відміну від статичних мнемосхем, розроблена візуалізація динамічно адаптується відповідно до поточних режимів енергоспоживання, що підвищує інформативність та ергономічність диспетчерського контролю.

На рисунку 1.3 наведено приклад функціонування системи в режимі активного опалення. Графічний інтерфейс включає візуалізацію теплових потоків та індикацію стану нагрівальних елементів, що забезпечує оперативну ідентифікацію зон підвищеного тепловиділення та просторовий контроль поширення теплової енергії в режимі реального часу. Даний рівень наочності мінімізує час реакції диспетчера на можливі температурні відхилення.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

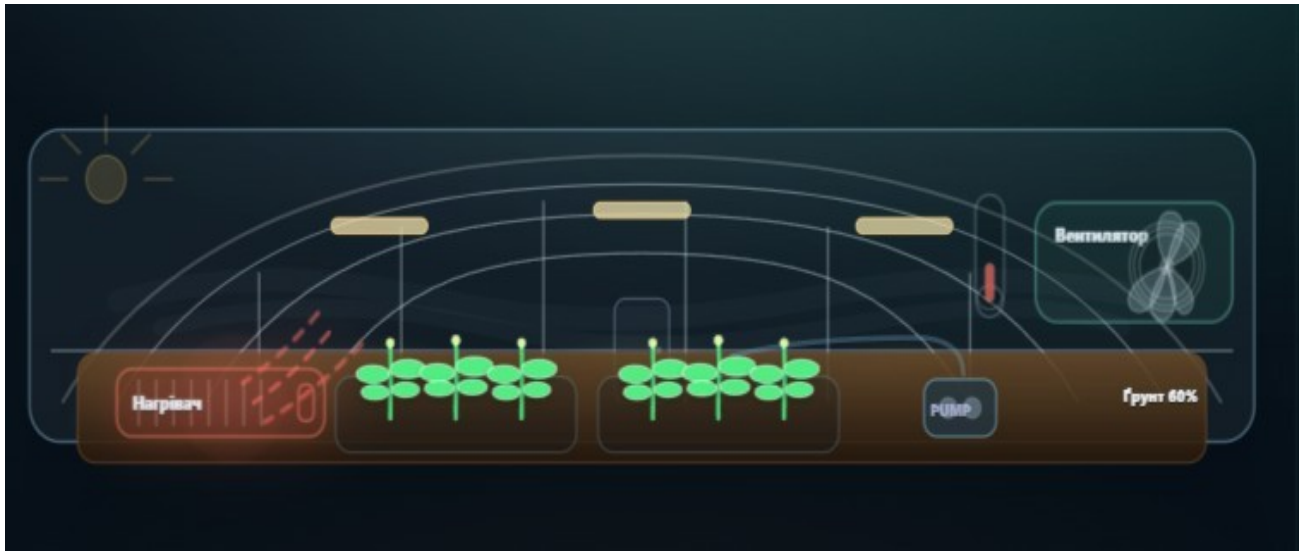


Рисунок 1.3 - Візуалізація стану системи в режимі підтримки температури (HEATING)

У разі перевищення гранично допустимих значень температури або відносної вологості повітря алгоритм керування автоматично ініціює перехід системи в режим примусової вентиляції. На рисунку 1.4 відображено динамічну модель розподілу повітряних потоків та поточний стан виконавчих механізмів вентиляційного вузла. Запропонований рівень деталізації графічного інтерфейсу забезпечує оперативний моніторинг енерговитрат на охолодження внутрішнього середовища та дозволяє здійснювати безперервний диспетчерський контроль за динамікою зміни стану об'єкта керування.

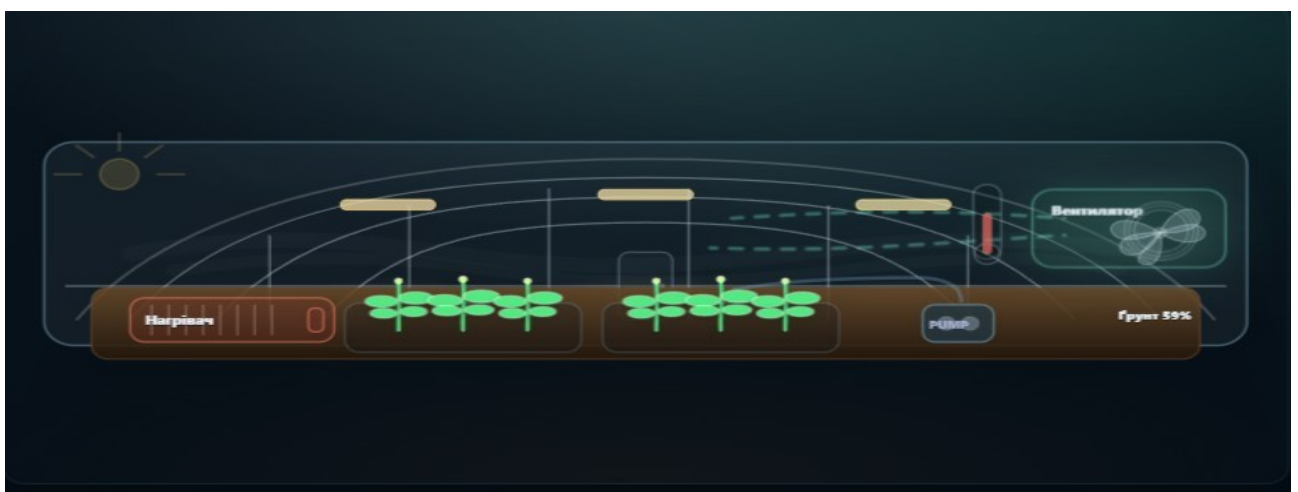


Рисунок 1.4 - Динамічна модель системи у режимі примусової вентиляції

Застосування зазначених апаратних засобів у комплексі з технологією цифрових двійників та модулем масштабованої векторної візуалізації формує основу для стабільного функціонування системи. Експериментальні дані щодо метрологічних похибок та динамічних характеристик сенсорів, отримані на етапі переддипломної практики, використано для параметричного налаштування алгоритмів цифрової обробки сигналів. Це забезпечило ефективну фільтрацію вимірювальних завад та запобігання хибним спрацюванням виконавчих механізмів. Отже, запропонована апаратно-програмна конфігурація відповідає встановленим критеріям точності, надійності та енергоефективності, що є підґрунтям для подальшого розроблення та дослідження алгоритмів керування мікрокліматом.

#### 1.4 Аналіз існуючих технічних рішень та їх обмежень

Сучасний ринок систем автоматизації агропромислового комплексу представлений широким спектром рішень, що варіюються від локальних контролерів до комплексних платформ розумного сільського господарства. Однак аналіз наявних комплексів у контексті розроблення кіберфізичних систем керування енергоспоживанням виявляє низку обмежень, що знижують ефективність їх застосування для оптимізації мікроклімату.

Першу групу становлять комерційні рішення промислової автоматики. Їхньою основною перевагою є високий рівень надійності та адаптованості до складних умов експлуатації. Водночас такі комплекси характеризуються закритою архітектурою, що суттєво ускладнює інтеграцію алгоритмів предиктивного керування та методів машинного навчання без придбання додаткових ліцензій. Крім того, використання пропрієтарних протоколів передачі даних створює перешкоди для розроблення гнучких кіберфізичних моделей на базі сучасних вебтехнологій та відкритих стандартів інформаційної безпеки [1].

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Друга група рішень базується на платформах Інтернету речей та мікроконтролерних системах із відкритим вихідним кодом. Такі платформи вирізняються низькою вартістю та наявністю значної бази програмних бібліотек. Попри це, зазначеним розробкам притаманна відсутність вбудованих механізмів автоматичної обробки аномальних станів та низький рівень захищеності від кіберфізичних атак [16]. У контексті енергозбереження такі комплекси здебільшого реалізують базові алгоритми двопозиційного регулювання. Відсутність урахування теплової інерційності об'єкта керування спричиняє значні енергетичні втрати внаслідок постійного перерегулювання та коливань технологічних параметрів.

Окремим аспектом аналізу є обмеженість програмних інтерфейсів користувача в наявних системах. Більшість рішень надає інформацію у вигляді табличних масивів або статичних графіків, що ускладнює оперативний аналіз стану системи. Для ефективного керування енергоспоживанням необхідна комплексна візуалізація термодинамічних процесів. Відсутність повноцінних цифрових двійників у комерційних комплексах перешкоджає оперативній ідентифікації неоптимальних або аварійних режимів роботи обладнання, що, своєю чергою, призводить до нераціонального використання енергоресурсів.

З метою систематизації виявлених недоліків та проведення порівняльного аналізу наявних рішень із запропонованою кіберфізичною системою сформовано зведену характеристику (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз технічних рішень для автоматизації теплиць

Параметр порівняння	Промислові ПЛК	Аматорські IoT-рішення	Проектована КФС
Вартість впровадження	Висока	Низька	Середня

Гнучкість алгоритмів	Обмежена (закритий код)	Висока (C++)	Максимальна (JavaScript/Node.js)
Візуалізація даних	Статичні мнемосхеми	Прості Dashboard	Динамічний SVG-двійник
Оптимізація енергії	Базові алгоритми	Відсутня	Прогнозне моделювання
Рівень кіберзахисту	Високий (апаратний)	Низький	Інтегровані модулі IDS

Кінець таблиці 1.1

Відповідно до результатів порівняльного аналізу (табл. 1.1), наявні системи автоматизації характеризуються або значною вартістю впровадження та закритою архітектурою, або недостатнім рівнем інтелектуалізації керуючих впливів для ефективної оптимізації енергоспоживання. Проєктована в межах цього дослідження кіберфізична система спрямована на подолання виявлених обмежень завдяки імплементації відкритої архітектури, застосуванню прецизійних цифрових сенсорів та реалізації алгоритмів керування, що базуються на термодинамічних моделях об'єкта. Запропонований підхід забезпечує раціональне співвідношення між економічною доцільністю впровадження та функціональними показниками системи в контексті підвищення енергоефективності агропромислового комплексу.

### 1.5 Сутність кіберфізичних систем у керуванні технічними об'єктами

Розвиток сучасних інформаційних технологій та промислової автоматизації супроводжується переходом від класичних автоматизованих систем керування до концепції кіберфізичних систем. Сутність цього підходу полягає в інтеграції обчислювальних ресурсів, мережевих комунікацій та

програмних алгоритмів із фізичними процесами об'єкта керування. У таких комплексах віртуальні та апаратні компоненти взаємодіють у режимі реального часу, утворюючи єдину автономну систему.

На відміну від традиційних систем автоматизації на базі програмованих логічних контролерів із жорсткою логікою керування, у кіберфізичних комплексах програмне забезпечення виконує функцію адаптивного обчислювального ядра. Це забезпечує можливість динамічного перерахунку коефіцієнтів керування, ідентифікації системних закономірностей та прогнозування майбутнього стану об'єкта на основі аналізу поточних телеметричних даних.

Архітектура кіберфізичної системи базується на принципі замкненого контуру інформаційного обміну між кібернетичним та фізичним рівнями. Обчислювальний рівень забезпечує обробку великих масивів даних, статистичний аналіз та формування керуючих впливів. Фізичний рівень представлений безпосередньо об'єктом автоматизації (у межах цього дослідження – теплицею), а також розподіленою мережею сенсорів і виконавчих механізмів.

Ключовим елементом архітектури є технологія цифрового двійника — програмно-математична модель фізичного об'єкта, що безперервно синхронізується з ним за допомогою телеметричних даних. Використання цифрового двійника дозволяє перейти від реактивного керування до предиктивного. Завдяки комп'ютерному моделюванню динаміки об'єкта та впливу зовнішніх збурень у віртуальному середовищі, обчислювальне ядро формує оптимальні керуючі впливи. Це забезпечує мінімізацію споживання енергоресурсів за умови дотримання заданих технологічних регламентів вегетації рослин.

Застосування кіберфізичного підходу є критично важливим для керування енергоспоживанням тепличних комплексів. Використання високорівневих мов програмування та серверних платформ обробки даних дозволяє інтегрувати в

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контур керування методи цифрової обробки сигналів, алгоритми предиктивної аналітики та підсистеми виявлення аномалій [24]. Така обчислювальна потужність здебільшого є недоступною для локальних промислових мікроконтролерів з обмеженими апаратними ресурсами.

Запропонована архітектура здатна ідентифікувати апаратну деградацію сенсорів, систематичні метрологічні похибки та кібернетичні втручання або маніпуляції з даними [25]. Оперативне виявлення зазначених аномалій запобігає хибним спрацюванням алгоритмів керування та аварійному ввімкненню енергоємного обладнання (систем освітлення, нагрівальних елементів).

Отже, впровадження кіберфізичних систем модифікує концепцію проектування агротехнічних комплексів, трансформуючи теплицю з пасивного об'єкта керування в автономний вузол, здатний до самостійної мінімізації витрат енергоресурсів, прогнозування тепловтрат та оптимізації технологічних режимів на основі аналізу масивів даних.

Визначальною характеристикою сучасних кіберфізичних систем (рис. 1.5) є їхня глибока мережецентричність, яка забезпечує безперервний зв'язок між віртуальним середовищем та реальним фізичним об'єктом. Інформаційний обмін у межах концепції Інтернету речей (IoT) між розподіленими фізичними сенсорами та центральним обчислювальним вузлом здійснюється за допомогою надійних стандартизованих мережевих протоколів [11]. Такий підхід гарантує високу швидкість передачі телеметрії та дозволяє делегувати складні, ресурсомісткі математичні розрахунки на рівень периферійних (Edge) або потужних хмарних обчислень. Завдяки цьому відбувається суттєве розвантаження локальних мікроконтролерів, що дозволяє їм зосередити всі свої апаратні ресурси виключно на прецизійному та безперервному зборі первинних даних без ризику виникнення програмних затримок. У цій роботі сутність кіберфізичного підходу практично реалізується шляхом тісної інтеграції мікроконтролерного апаратного забезпечення та розширеного програмного симулятора. Саме така дворівнева архітектура гарантує необхідну гнучкість,

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

простоту масштабування комплексу та загальну високу ефективність керування технологічним об'єктом навіть за умов раптових і динамічних зовнішніх збурень.

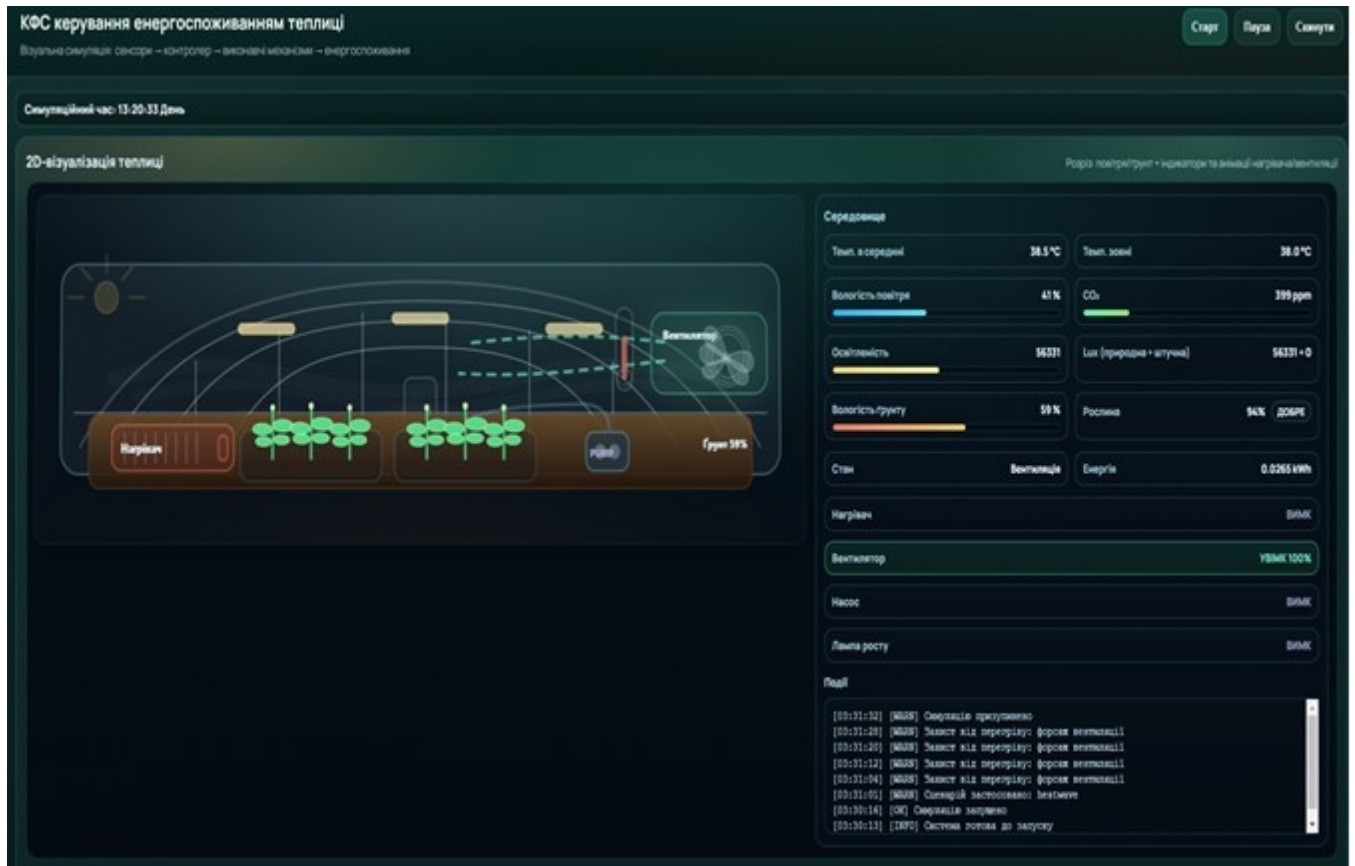


Рисунок 1.5 – Принципова схема взаємодії фізичного та кібернетичного рівнів у кіберфізичній системі

## 1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз об'єкта дослідження, наявних методів моніторингу та апаратних засобів керування мікрокліматом у контексті побудови енергоефективної кіберфізичної системи. За результатами проведених досліджень доведено, що споруди закритого ґрунту є складними багатозв'язними динамічними об'єктами з високою тепловою інерційністю. Встановлено, що оптимізація енергоспоживання вимагає комплексного врахування кореляційних зв'язків між

температурою, вологістю, рівнем освітленості та концентрацією діоксиду вуглецю, ігнорування яких у традиційних системах автоматизації призводить до нераціонального використання енергоресурсів. З огляду на це, обґрунтовано доцільність застосування кіберфізичного підходу. На відміну від класичних автоматизованих систем, проєктований комплекс базується на технології цифрового двійника, що забезпечує можливість високоточного регулювання параметрів через обчислювальне ядро та імплементації предиктивних алгоритмів керування з урахуванням зовнішніх збурень і термодинамічної моделі об'єкта.

У межах розділу здійснено обґрунтування вибору елементної бази. За підсумками аналізу технічних характеристик та експериментальних випробувань обрано цифрові вимірювальні модулі DHT22, MH-Z19B та BH1750, які гарантують необхідну точність збору телеметричних даних та високу завадостійкість, що є базовою умовою функціонування алгоритмів енергозбереження. Крім того, розроблено підсистему візуалізації станів об'єкта на основі технологій масштабованої векторної графіки. Створені динамічні моделі режимів активного опалення та примусової вентиляції забезпечують візуальний моніторинг фаз енергоспоживання та просторового розподілу теплових потоків, що підвищує ергономічність диспетчерського контролю та оперативність реагування на технологічні аномалії.

На основі порівняльного аналізу наявних ринкових рішень встановлено, що більшість комерційних платформ характеризуються закритою архітектурою та обмеженим інструментарієм інтелектуального енергозбереження. Проєктована кіберфізична система нівелює зазначені обмеження завдяки імплементації відкритого програмного стека на базі сучасних вебтехнологій, що дозволяє безперешкодно інтегрувати модулі кіберзахисту та оптимізації. Отже, результати першого розділу формують фундаментальну теоретичну та апаратно-технічну базу для подальшого розроблення алгоритмічного забезпечення та практичної реалізації кіберфізичної системи в наступних розділах роботи.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

### 2.1 Формування архітектури системи та логіки взаємодії компонентів

Проектне рішення щодо створення кіберфізичної системи керування енергоспоживанням ґрунтується на дворівневій архітектурі, яка забезпечує декомпозицію задач збору телеметричних даних та високорівневої обчислювальної обробки. Архітектурна модель базується на принципі модульності з чітким розподілом функцій між компонентами, взаємодія яких здійснюється за допомогою стандартизованих протоколів передачі даних [18]. Запропонований підхід підвищує відмовостійкість системи та забезпечує можливість її масштабування, що є визначальним фактором для об'єктів агропромислового комплексу.

Фізичний рівень системи представлений розподіленою мережею сенсорних вузлів та виконавчих механізмів, які безпосередньо взаємодіють з об'єктом керування. На цьому етапі здійснюється первинна фільтрація вимірювальних сигналів та аналого-цифрове перетворення фізичних величин. Головною функцією апаратного рівня є забезпечення достовірності інформаційних потоків та оперативне виконання керуючих впливів, згенерованих обчислювальним ядром. Відповідно до результатів натурних досліджень, застосування цифрових інтерфейсів передачі даних дозволяє мінімізувати вплив електромагнітних завад, індукованих роботою потужних нагрівальних елементів та електродвигунів.

Кібернетичний рівень, розроблений на базі платформи виконання асинхронного серверного коду, виконує функцію обчислювального центру системи [20]. На цьому рівні імплементовано цифровий двійник об'єкта дослідження, який у режимі реального часу здійснює обробку масивів даних щодо температурно-вологісного режиму, рівня освітленості та концентрації діоксиду вуглецю [21]. Програмне ядро обробляє вхідну телеметрію комплексно,

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ідентифікуючи поточний багатовимірний стан системи. На основі математичної моделі об'єкта обчислювальний модуль здійснює предиктивний аналіз динаміки параметрів та генерує оптимальні керуючі впливи для мінімізації витрат енергоресурсів.

Алгоритмічна взаємодія компонентів системи (рис. 2.1) базується на подієво-орієнтованій архітектурі. Кожна зміна вимірюваної фізичної величини ініціює генерацію інформаційної події, що транслюється до віртуальної моделі. У разі виходу значень за встановлені межі технологічного допуску або агротехнічних регламентів активується підсистема прийняття рішень. Визначальною характеристикою синтезованої логіки є пріоритетизація енергозбереження: алгоритм насамперед ініціює пасивні методи регулювання, зокрема системи природного повітрообміну, і лише за їхньої неефективності активує енергоємне обладнання. Запропонована концепція забезпечує стабілізацію мікроклімату з мінімальними витратами ресурсів, що є головним критерієм ефективності розробленої кіберфізичної системи.

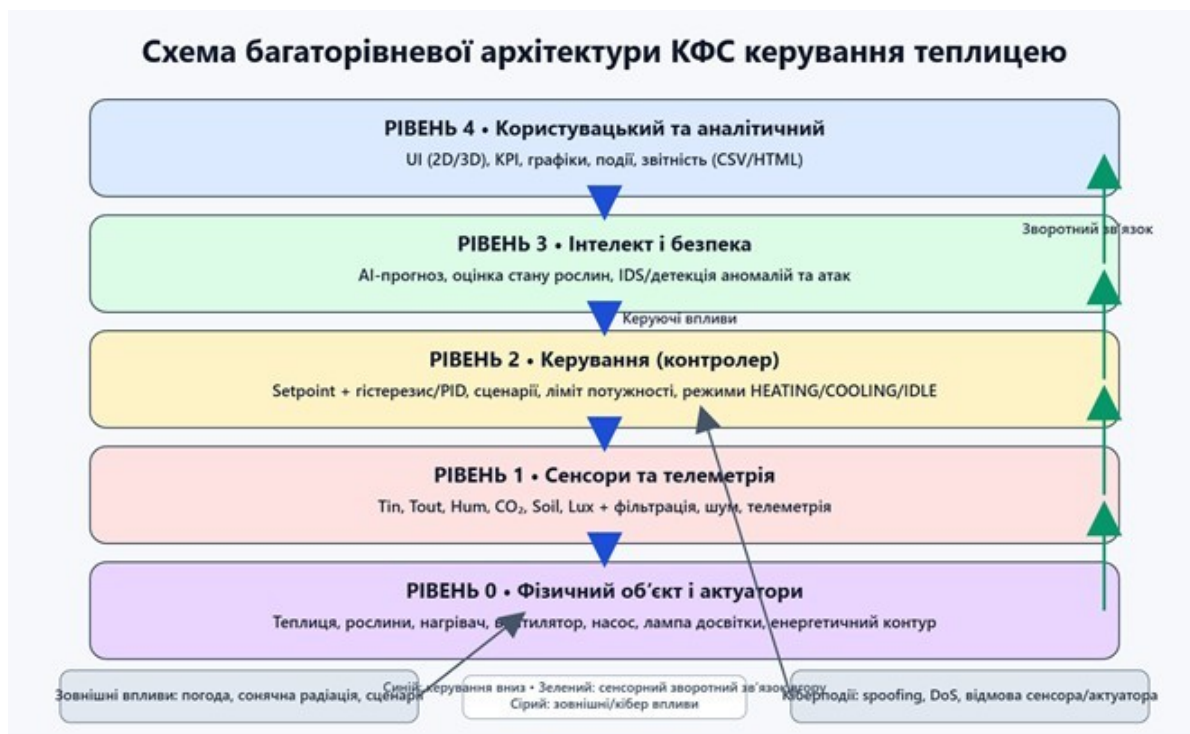


Рисунок 2.1 – Схема багаторівневої архітектури кіберфізичної системи керування теплицею

## 2.2 Алгоритмічне забезпечення кіберфізичної системи керування мікрокліматом

Функціонування розробленої кіберфізичної системи базується на ієрархічній структурі алгоритмів. Головний керуючий цикл забезпечує координацію всіх підсистем, тоді як спеціалізовані локальні алгоритми здійснюють контроль окремих фізичних параметрів. Запропонований підхід забезпечує реалізацію багаторівневої логіки оптимізації енергоспоживання зі збереженням загальної стійкості системи. На рисунку 2.2 наведено блок-схему головного алгоритму, який виконує функцію обчислювального ядра кіберфізичної моделі.

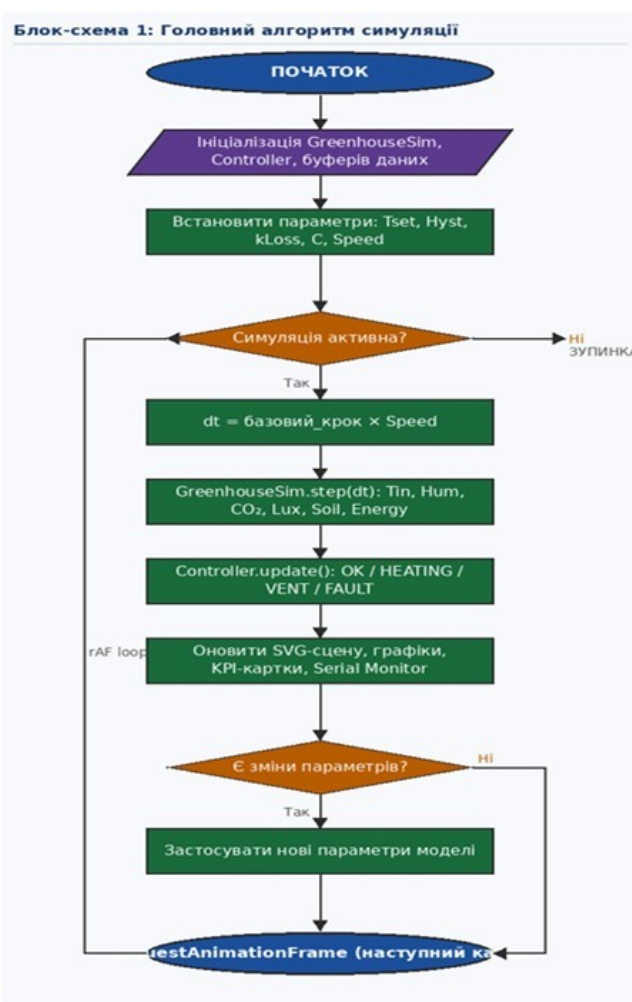


Рисунок 2.2 – Блок-схема головного алгоритму роботи кіберфізичної моделі

Головний алгоритм функціонує за подієво-циклічним принципом. Після етапу ініціалізації програмних об'єктів середовища та модуля візуалізації алгоритм переходить у нескінченний циклічний режим роботи, у межах якого з фіксованим кроком часу здійснюється опитування віртуальних сенсорних вузлів. У разі фіксації зміни значень вимірюваних величин система ініціює перерахунок стану цифрового двійника та генерує команди для оновлення параметрів графічного інтерфейсу. Це гарантує оперативне відображення актуальної динаміки енергоспоживання для здійснення безперервного диспетчерського контролю. Окрему роль у структурі програмного комплексу відведено підсистемі терморегуляції, оскільки процеси опалення є найбільш енергоємними. Детальну логіку функціонування контролера температури відображено на рисунку 2.3.

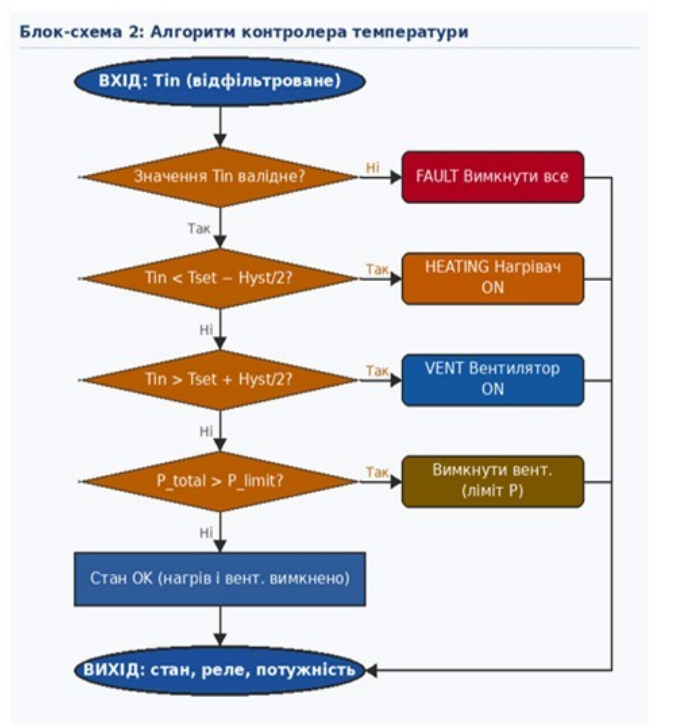


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму спеціалізованого контролера температури

Відповідно до структурної схеми, логіка регулювання локального контролера базується на класичному двопозиційному законі з імплементацією

температурного гістерезису [31]. Цей підхід було адаптовано з метою мінімізації комутаційних навантажень на апаратну частину комплексу. Процес керування розпочинається з безперервного порівняння поточного значення температури, що надходить із сенсорної мережі, з нижньою межею технологічного допуску. Ця межа розраховується автоматично як різниця між цільовою температурною уставкою та попередньо визначеною величиною зони нечутливості. У разі зниження температури нижче розрахованого порогу обчислювальне ядро генерує керуючий вплив на замикання силових контактів системи опалення та одночасно ініціює відповідну індикацію на графічному інтерфейсі. Процес активного нагрівання об'єму повітря триває не лише до досягнення цільової уставки, а продовжується до моменту перетину верхньої межі гістерезису. Формування такої штучної зони нечутливості запобігає високочастотним комутаціям силового обладнання за умов незначних флуктуацій температури, що суттєво знижує електричне та механічне зношування магнітних пускачів.

Декомпозиція та багаторівнева структура алгоритмічного забезпечення гарантують високу точність стабілізації параметрів мікроклімату на об'єкті керування. Завдяки програмній ізоляції алгоритму локального терморегулятора від головного циклу обміну даними та опитування периферії, забезпечується високий рівень гнучкості системи. Запропонована архітектура дозволяє здійснювати незалежне параметричне налаштування режимів енергозбереження та меж спрацювання для окремих технологічних зон без необхідності внесення змін до базового програмного ядра, гарантуючи при цьому стабільність функціонування суміжних модулів комплексу.

### 2.3 Пропорційно-інтегрально-диференціальне регулювання у задачі стабілізації температурного режиму теплиці

Застосування виключно двопозиційного (релейного) регулювання є недостатнім для забезпечення високої точності стабілізації параметрів

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроклімату на промислових об'єктах. З огляду на значну теплову інерційність огорожувальних конструкцій та об'єму повітряних мас теплиці, нагрівальні елементи продовжують віддавати акумульовану теплову енергію навіть після зняття напруги живлення. Внаслідок цього температура експоненційно зростає за інерцією, що спричиняє ефект перерегулювання системи, порушення технологічних регламентів вегетації та нераціональні витрати енергоресурсів.

Для розв'язання цієї задачі у структуру кіберфізичної системи інтегровано алгоритм пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) керування [18]. Зазначений закон регулювання дозволяє формувати неперервний керуючий вплив на виконавчі механізми, розраховуючи потужність на основі поточного відхилення (пропорційна складова), накопиченої похибки (інтегральна складова) та швидкості зміни керованої величини (диференціальна складова) [42].

Процес стабілізації термодинамічного режиму за допомогою ПІД-алгоритму ґрунтується на математичному синтезі трьох функціональних компонентів:

Пропорційна складова формує вихідний сигнал, прямо пропорційний величині поточної похибки регулювання (різниці між дійсним значенням температури та цільовою уставкою). Що більшим є відхилення, то вищою є потужність керуючого впливу, яка асимптотично знижується в міру наближення температури до заданого значення.

Інтегральна складова призначена для компенсації статичної похибки системи. Алгоритм безперервно акумулює інтеграл роззгодження в часі, зумовлений дією неконтрольованих зовнішніх збурень (зокрема, тепловтратами). Це забезпечує плавне доведення керованої величини до цільової уставки, усуваючи залишкову розбіжність, некомпенсовану пропорційним контуром.

Диференціальна складова генерує випереджувальний вплив на основі аналізу похідної швидкості зміни температури. У разі стрімкого зростання керованої величини ця складова формує сигнал, що зменшує загальну

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужність нагрівання ще до моменту перетину лінії уставки. Це дозволяє ефективно демпфувати динамічні відхилення та нівелювати явище перерегулювання системи.

Параметричне налаштування контуру регулювання під динамічні властивості конкретного об'єкта здійснюється шляхом підбору відповідних вагових коефіцієнтів (пропорційного, інтегрального та диференціального). Використання трикомпонентного закону керування забезпечує плавний вихід системи на заданий температурний режим без виникнення автоколивань та пускових перевантажень у мережі живлення.

У розробленій графічній моделі моніторингу динаміка зміни вихідної потужності ПД-регулятора візуалізується шляхом зміни параметрів прозорості (альфа-каналу) та швидкості анімації теплових потоків. Це забезпечує оперативний диспетчерський контроль за енергетичним навантаженням виконавчих механізмів в інтуїтивно зрозумілому форматі.

**Рисунок 2.4** — Перехідний процес стабілізації температури КПС

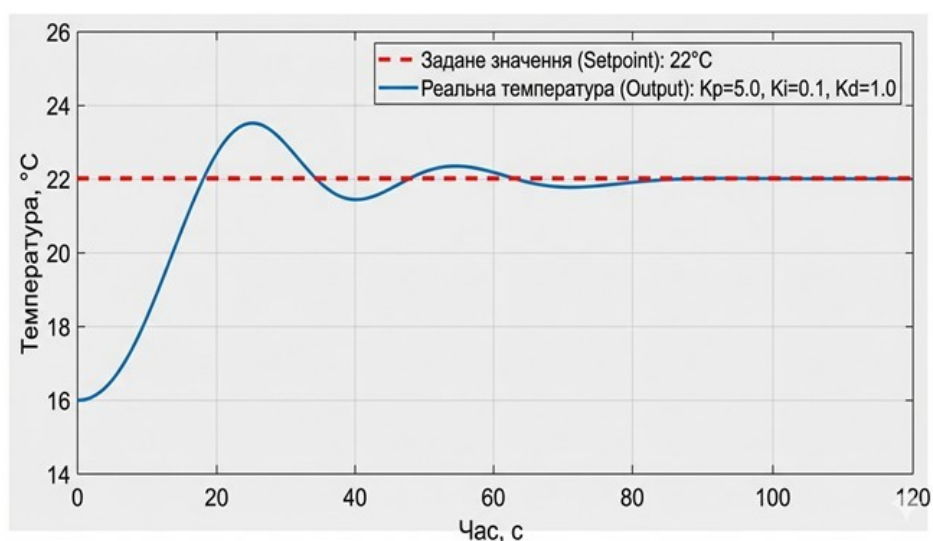


Рисунок 2.4 – Перехідний процес стабілізації температури з використанням ПД-алгоритму

Програмну реалізацію алгоритму в середовищі виконання обчислювального ядра наведено у вигляді функції, інтегрованої в головний цикл обробки телеметрії:

## JavaScript

```
// Реалізація логіки ПІД-регулювання для об'єкта Greenhouse
function updateTemperatureControl(targetT, currentT) {
    let error = targetT - currentT;
    this.integralSum += error * this.sampleTime;
    let deltaError = (error - this.lastError) / this.sampleTime;
    // Розрахунок сигналу керування (від 0 до 100%)
    let power = (this.Kp * error) + (this.Ki * this.integralSum
* deltaError);
    this.lastError = error;
    return Math.min(Math.max(power, 0), 100); // Обмеження потужності
}
```

Імплементація такого алгоритмічного підходу в структуру кіберфізичної системи дозволяє досягти суттєвої економії енергоресурсів. Зниження енергоспоживання забезпечується завдяки тому, що система генерує виключно мінімально необхідну потужність для підтримки термодинамічного балансу, унеможливаючи пікові навантаження та гарантуючи стабільні умови мікроклімату. Таким чином, перехід від дискретної релейної логіки до неперервного алгоритмічного регулювання є визначальним фактором підвищення загальної енергоефективності проєктованого комплексу.

### 2.4 Обґрунтування вибору програмних засобів розробки та засобів візуалізації

Проєктування програмного забезпечення кіберфізичної системи вимагає обґрунтованого підбору технологічного стека, здатного забезпечити високу швидкість обробки даних у режимі реального часу, кросплатформність та можливість інтеграції з гетерогенним апаратним забезпеченням. На відміну від класичних автоматизованих систем керування, що базуються на закритих

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пропрієтарних рішеннях, у межах цього дослідження реалізовано підхід із використанням відкритих вебтехнологій та асинхронних архітектур.

Функцію обчислювального середовища для кібернетичного ядра системи виконує платформа виконання асинхронного серверного коду. Її використання зумовлено наявністю неблокуючої моделі вводу-виводу, що є критично важливим для обробки асинхронних потоків телеметричних даних [1]. Механізм обробки подій дозволяє паралельно обслуговувати масиви сенсорних даних без створення ресурсомістких потоків для кожного підключення. Застосування сучасного синтаксису мови програмування високого рівня гарантує високу продуктивність завдяки компіляції алгоритмів у машинний код та забезпечує уніфіковану роботу з інформаційними структурами у форматі об'єктної нотації [3]. Це дозволяє підтримувати єдину модель даних на всіх етапах функціонування системи: від перетворення аналогових сигналів до візуалізації графіків, мінімізуючи витрати процесорного часу на конвертацію протоколів між архітектурними рівнями. Додатковою перевагою є наявність розгалуженої екосистеми програмних пакетів для роботи з мережевими протоколами та послідовними портами, що забезпечує безперешкодну інтеграцію програмної моделі з апаратною частиною мікроконтролерів.

Окремим аспектом розроблення є реалізація підсистеми візуалізації та диспетчеризації. Для створення інтерактивної панелі керування застосовано технологію масштабованої векторної графіки у комплексі з бібліотеками маніпуляції об'єктною моделлю документа. Застосування векторної графіки замість растрової ґрунтується на об'єктно-орієнтованому підході до проєктування: кожен функціональний елемент технологічної мнемосхеми (витяжний вентилятор, електричний нагрівач, джерело освітлення) представлений як незалежний векторний об'єкт із власним ідентифікатором. Така архітектура дозволяє програмно керувати візуальними станами елементів. Зокрема, алгоритм здатен динамічно адаптувати швидкість анімації обертання

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вентилятора пропорційно до величини поточного сигналу, згенерованого ПІД-регулятором.

Крім того, застосування масштабованої векторної візуалізації гарантує збереження пропорцій та якості відображення графічного інтерфейсу на дисплеях із різною роздільною здатністю, від промислових моніторів диспетчерського пункту до екранів портативних пристроїв. Важливою технологічною особливістю є також апаратне прискорення рендерингу графіки: промальовування векторних примітивів здійснюється графічним процесором клієнтського терміналу. Це суттєво зменшує навантаження на центральний процесор обчислювального вузла, вивільняючи ресурси для виконання пріоритетних математичних розрахунків, пов'язаних із підтриманням багатовимірної цифрової двійника об'єкта.

З метою систематизації вибору програмних засобів та обґрунтування доцільності імплементації розробленого технологічного стека здійснено порівняльний аналіз, результати якого зведено до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз програмних засобів реалізації КФС

Критерій порівняння	Традиційні АСК (ПЛК / C++)	Обраний стек (Node.js / JS / SVG)
Швидкість розгортання	Низька	Висока (стандартний веб-браузер)
Робота з даними	Складна інтеграція з БД та АРІ	Рідна підтримка JSON та асинхронності
Візуалізація	Статичні мнемосхеми	Динамічна 2D/3D візуалізація
Масштабованість	Обмежена	Практично необмежена
Вартість ліцензій	Висока	Відсутня

Отже, інтеграція асинхронного серверного середовища для розрахункового ядра та векторних технологій для графічної візуалізації забезпечує створення програмного комплексу, що відповідає сучасним критеріям кіберфізичних систем. Таке архітектурне рішення гарантує раціональне використання апаратних ресурсів і формує програмне підґрунтя для імплементації методів предиктивної аналітики та модулів захисту інформації на подальших етапах розроблення системи.

## 2.5 Модуль діагностики, шаблонізації та прогнозування енергетичних витрат

Ефективність сучасних автоматизованих систем керування тепличними комплексами визначається можливістю стандартизації умов мікроклімату для різних видів агрокультур. У розробленій системі цей підхід реалізовано за допомогою спеціалізованих конфігураційних профілів, кожен з яких містить набір критичних параметрів життєдіяльності конкретної культури. Використання таких профілів забезпечує високий рівень автоматизації технологічних процесів та мінімізує необхідність втручання оператора.

У разі вибору відповідної культури через графічний інтерфейс, обчислювальне ядро автоматично завантажує цільові значення температури, відносної вологості повітря, вологості субстрату та рівня інсоляції. Алгоритм функціонує за принципом керування з відхиленням: у разі реєстрації роззгодження між поточними показами сенсорної мережі та заданими уставками, система генерує керуючий вплив на активацію відповідних виконавчих механізмів – нагрівальних елементів, систем зволоження або штучного освітлення. Впровадження конфігураційних профілів гарантує підтримку стабільних термодинамічних умов та забезпечує можливість оперативного переналаштування комплексу під вирощування інших видів рослин, що є важливою вимогою до комерційних агропідприємств.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.6 Алгоритм діагностики та симуляція добового циклу

Підсистема діагностики, результати роботи якої відображено у відповідному звіті, ґрунтується на методах імітаційного моделювання. Обчислювальне ядро ініціює алгоритм симуляції для аналізу параметрів функціонування всіх технологічних вузлів теплиці впродовж добового циклу. На основі номінальної потужності кожного виконавчого механізму система здійснює акумулювання даних щодо споживання електроенергії та водних ресурсів із подальшою їх візуалізацією за допомогою графічних індикаторів.

Деталізація діагностичних процедур передбачає структурний розподіл ресурсоспоживання за ключовими технологічними підсистемами. Зокрема, для підсистеми опалення здійснюється моніторинг тривалості активної фази термоелементів та аналізується їхній вплив на загальне струмове навантаження мережі. Аналіз підсистеми вентиляції включає оцінювання робочих циклів електродвигунів, спрямованих на стабілізацію температурно-вологісного режиму. Моніторинг підсистеми штучного освітлення передбачає облік енерговитрат на підтримку належного рівня інсоляції для забезпечення процесів фотосинтезу, що є найбільш енергоємним процесом за умов значної хмарності. Своєю чергою, контроль контуру зрошення базується на аналізі функціонування насосного обладнання для забезпечення нормативної вологості ґрунтового субстрату.

Візуалізація зазначених показників у звіті реалізується за допомогою шкальних індикаторів. Це забезпечує диспетчерському персоналу можливість оперативного аналізу структури розподілу енергетичних ресурсів між вузлами комплексу. Фіксація системою аномально високих показників споживання слугує автоматичним індикатором для ініціювання технічного аудиту обладнання з метою виявлення апаратної деградації або експлуатаційних несправностей.

## 2.7 Економічний аналіз та фінансове прогнозування

З метою забезпечення комплексного контролю економічних показників функціонування об'єкта, до структури модуля прогнозування інтегровано алгоритми розрахунку фінансових витрат. Інтерфейс системи дозволяє оператору здійснювати параметричне введення поточних тарифних ставок на електроенергію та водопостачання. Застосовуючи ці вхідні дані, обчислювальне ядро генерує калькуляцію добової вартості обслуговування комплексу та формує екстрапольований прогноз операційних витрат на тридцятиденний період.

Математичний апарат прогнозування базується на комплексному врахуванні низки ключових факторів. Зокрема, алгоритм аналізує погодинні графіки струмового навантаження для оптимізації розрахунків з урахуванням пікових періодів споживання. Крім того, здійснюється моніторинг показників локальної генерації енергії за допомогою сонячних панелей, що дозволяє визначити чисту частку електроенергії, яка імпортується із загальної мережі. Окремим функціоналом є підтримка інтеграції багатозонних тарифних планів, що забезпечує високу точність фінансової оцінки спожитих ресурсів.

Згенерована звітність надає диспетчерському персоналу консолідовану інформацію щодо структури місячних витрат на енергоносії та водопостачання. Зазначений функціонал формує аналітичне підґрунтя для планування бюджету та імплементації заходів з енергозбереження. Як приклад, алгоритмічне ядро дозволяє оптимізувати роботу енергоємного обладнання шляхом зміщення робочих циклів на періоди дії знижених нічних тарифів за умови дотримання агротехнічних норм вегетації. Отже, розроблений інструментарій розширює функціонал комплексу від системи автоматичного керування до платформи комплексного техніко-економічного аналізу функціонування об'єктів закритого ґрунту.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.8 Механізм виявлення аномалій та запобігання перевитратам

Окрім кількісного обліку спожитих ресурсів, модуль діагностики здійснює безперервний алгоритмічний моніторинг щодо виникнення нештатних режимів функціонування апаратного забезпечення. Принцип дії цього механізму ґрунтується на математичному зіставленні фактичних показників енергоспоживання з еталонними значеннями, регламентованими технологічною картою для обраної агрокультури. Під час ініціалізації процесу моделювання або в умовах штатної експлуатації обчислювальне ядро генерує базовий енергетичний профіль об'єкта.

У разі реєстрації алгоритмом ситуації, за якої тривалість активної фази нагрівальних елементів суттєво перевищує розрахункові показники, проте цільова температурна уставка не досягається, програмний комплекс класифікує цей стан як технологічну аномалію. Фізичним підґрунтям такого відхилення може бути порушення теплоізоляції огорожувальних конструкцій, апаратна деградація термоелементів або систематична метрологічна похибка вимірювальних модулів. За цих умов контур керування ініціює блокування подальшої генерації керуючих впливів на виконавчі механізми для запобігання нераціональному витрачання електроенергії, одночасно фіксуючи код помилки у відповідному звіті.

Аналогічний алгоритм діагностики імплементовано в підсистему зрошення. Якщо після відпрацювання нормативного циклу насосного обладнання сенсор вологості субстрату не фіксує відповідного градієнта збільшення рівня вологи, система ідентифікує можливість розгерметизації гідравлічного контуру або дефіциту рідини в акумулюючому резервуарі. Оперативна ідентифікація зазначених розгроджень забезпечує запобігання порушенням біологічних процесів вегетації та мінімізує економічні збитки, зумовлені нецільовим функціонуванням енергоємного обладнання. Згенеровані діагностичні дані автоматично транслюються на панель диспетчеризації у

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вигляді превентивних сповіщень, що дозволяє обслуговуючому персоналу ідентифікувати апаратні відхилення на ранніх етапах виникнення аварійних ситуацій.

## 2.9 Оптимізація налаштувань на основі результатів симуляції

Отримавши детальний добовий звіт та прогноз витрат на тридцять днів, користувач має можливість провести оптимізацію роботи теплиці. Цей процес реалізується через коригування існуючих шаблонів вирощування та перевірку нових параметрів за допомогою повторного запуску симуляції. Це дозволяє використовувати систему як тренажер для пошуку найкращого балансу між економією коштів та комфортом для рослин.

Наприклад, якщо прогноз на місяць показує занадто високу вартість витрат на електроенергію через роботу системи освітлення, оператор може зайти в налаштування шаблону і трохи знизити вимоги до інтенсивності світла або змістити графік роботи ламп. Після збереження нових параметрів система знову запускає внутрішню перевірку добового циклу і видає оновлений графік витрат. Користувач одразу бачить, як зміна одного показника в шаблоні вплинула на кінцеву суму в гривнях.

Крім того, інструмент діагностики допомагає планувати роботу обладнання з урахуванням різних тарифних зон на електроенергію. Аналізуючи графіки споживання, користувач може прийняти рішення перенести енергоємні процеси, такі як наповнення резервуарів водою або інтенсивний обігрів, на нічний час, коли діє знижений тариф. Система дозволяє врахувати ці зміни у своїх розрахунках, показуючи реальну економію бюджету. Таким чином, модуль прогнозування не лише констатує факт витрат, а й надає власнику теплиці дієвий механізм для їх зменшення без ризику погіршити якість врожаю.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.9.1 Програмно-апаратна реалізація інтерфейсу управління та моніторингу

Ефективність функціонування кіберфізичної системи залежить від якості програмного інструментарію, що використовується оператором для диспетчеризації технологічних процесів. У цьому підрозділі розглянуто архітектуру та функціональні можливості програмного середовища, яке забезпечує імплементацію конфігураційних профілів та проведення аудиту енергетичних витрат.

## 2.9.2. Інтеграція шаблонів вирощування

З метою оптимізації керування параметрами мікроклімату в структурі програмного комплексу реалізовано модуль конфігураційних профілів (рис. 2.5). Цей алгоритм забезпечує автоматизоване визначення режимів функціонування виконавчих механізмів відповідно до біологічних характеристик конкретних агрокультур.

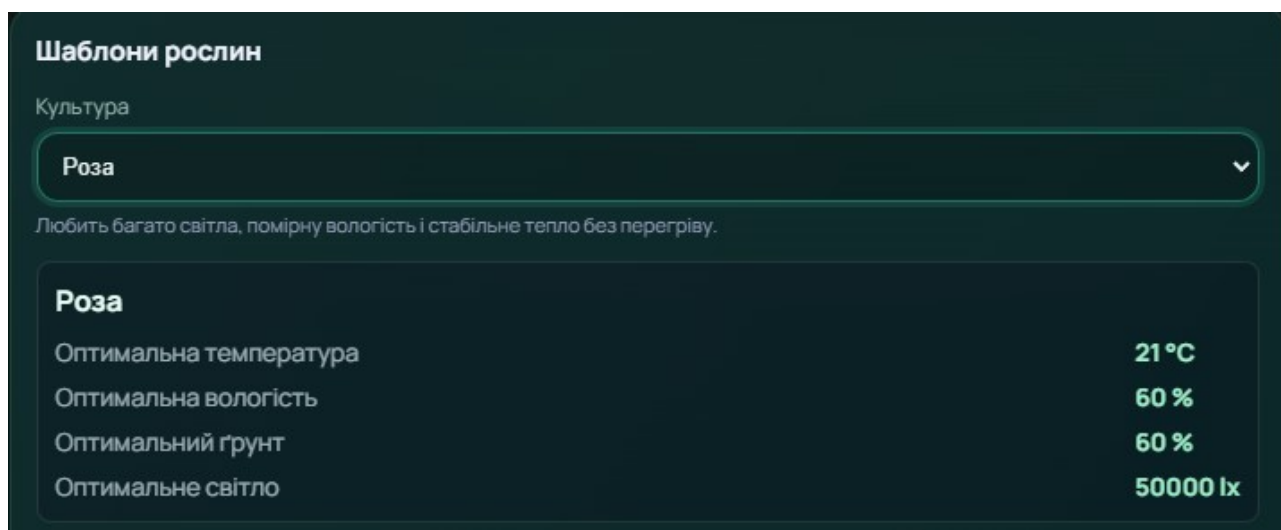


Рисунок 2.5 – Інтерфейс вибору та налаштування конфігураційних профілів мікроклімату

Відповідно до графічного інтерфейсу (рис. 2.5), оператор здійснює вибір агрокультури через елемент програмного селектора. Після ідентифікації об'єкта обчислювальне ядро автоматично завантажує цільові уставки для ключових термодинамічних параметрів: температури, відносної вологості повітря, вологості ґрунтового субстрату та рівня інсоляції. Застосування такого архітектурного рішення мінімізує імовірність виникнення помилок, зумовлених людським фактором, оскільки система в автономному режимі ініціалізує граничні значення технологічного допуску для апаратного забезпечення. Окрім числових показників, кожен профіль містить текстову специфікацію агротехнічних вимог, що підвищує рівень інформативності під час диспетчерського контролю.

### 2.9.3. Діагностика витрат та прогнозування ресурсів

Ключовою функцією аналітичного модуля є здатність оцінювати економічну ефективність функціонування тепличного комплексу. Для реалізації цього завдання розроблено алгоритм математичного моделювання, який здійснює безперервне інтегрування значень миттєвої потужності кожного виконавчого механізму за часом. Це дозволяє сформувати високоточний профіль енергетичного навантаження за добовий цикл. Отримані результати піддаються процедурі статистичної екстраполяції на місячний горизонт планування. Алгоритм екстраполяції враховує не лише пряме множення базових добових показників, але й згладжує стохастичні флуктуації навантаження, зумовлені добовими змінами зовнішніх метеорологічних умов.

Графічний інтерфейс модуля звітності (рис. 2.6) забезпечує деталізований структурний аналіз енергоспоживання, диференційований за ключовими технологічними підсистемами: опалення, вентиляції, освітлення та зрошення. Завдяки візуалізації показників у вигляді інтерактивних шкальних індикаторів

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оператор забезпечується інструментарієм для оперативного моніторингу енергетичного балансу.

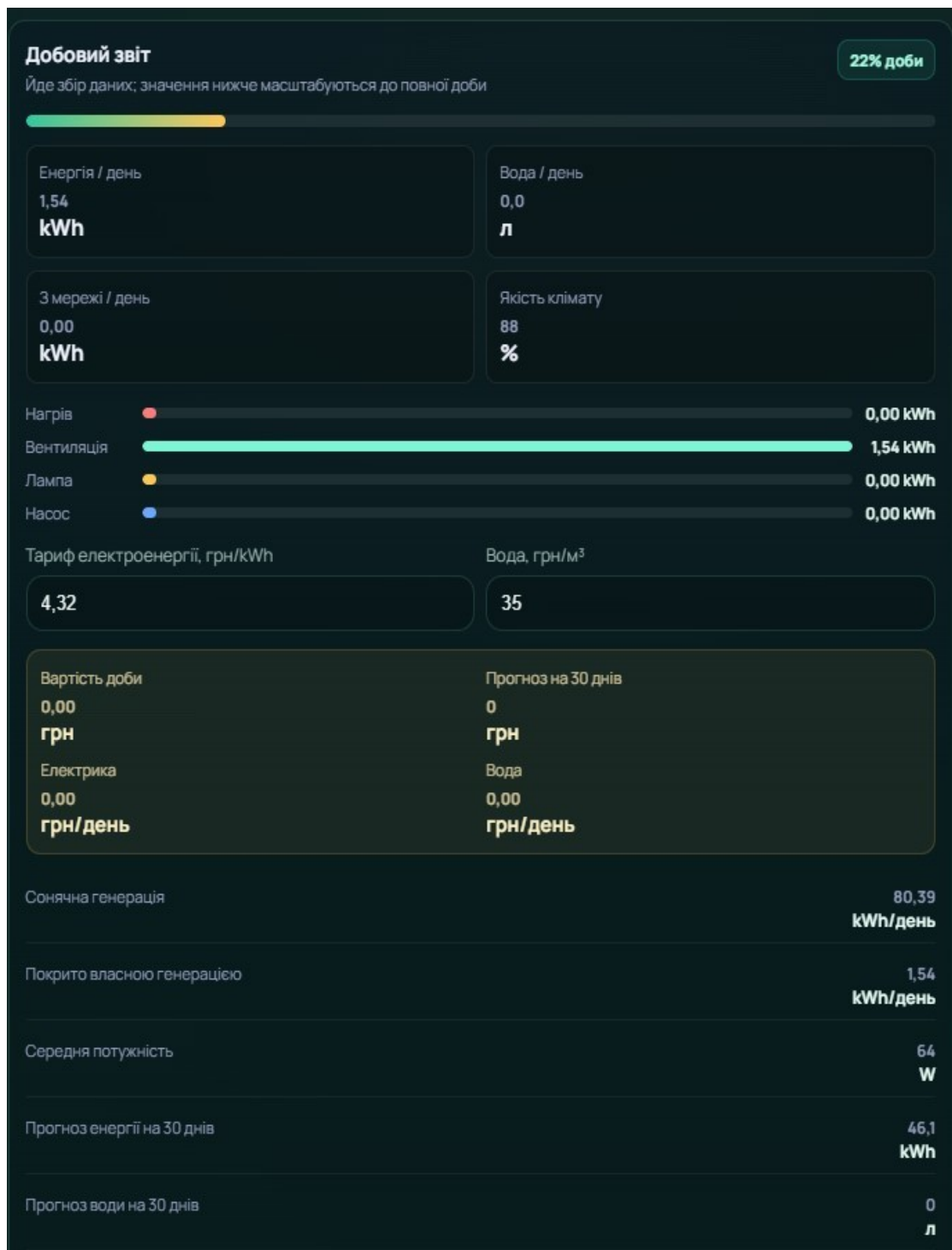


Рисунок 2.6 – Панель добового звіту, діагностики витрат та прогнозування вартості утримання

Заповнення шкали підсистеми опалення сигналізує про надмірні тепловтрати об'єкта внаслідок зниження зовнішньої температури, тоді як високий відсоток споживання підсистеми освітлення вказує на інтенсивну роботу фітоламп, що потребує алгоритмічного коригування у світлу пору доби. Така диференціація дозволяє точно локалізувати апаратні вузли з максимальним рівнем енергетичного навантаження.

Важливим функціональним компонентом аналітичного модуля є блок конфігурування тарифних сіток, що забезпечує калькуляцію експлуатаційних витрат у грошовому еквіваленті. Архітектура підсистеми підтримує інтеграцію диференційованих багатозонних тарифів, що дозволяє алгоритму автоматично розраховувати вартість спожитої електроенергії залежно від часу доби. Алгоритм прогнозування витрат на тридцятиденний період здійснює крос-кореляцію поточних тарифних показників із результатами добового моделювання навантажень. Це створює надійну аналітичну базу для планування бюджету підприємства та превентивної корекції робочих циклів силового обладнання з метою перенесення енергоємних технологічних операцій на періоди дії знижених нічних тарифних ставок.

Окремою складовою алгоритму економічного аудиту є розрахунок сумарного енергетичного балансу з урахуванням локальної генерації. Модуль безперервно аналізує обсяги електроенергії, виробленої сонячними панелями, та логічно віднімає цей показник від загального обсягу споживання. Це дозволяє диспетчеру оцінити реальний відсоток енергетичної автономності об'єкта та розрахувати чисту вартість електроенергії, що імпортується із загальної мережі. Така комплексна інтеграція телеметричних даних щодо споживання ресурсів, показників відновлюваної генерації та методів фінансового прогнозування визначає розроблений модуль як повноцінний інструмент техніко-економічного аналізу, що є умовою для комерційної експлуатації сучасних кіберфізичних систем.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.10 Висновки до другого розділу

У другому розділі здійснено комплексне проектування та програмну реалізацію кіберфізичної системи керування енергоспоживанням і мікрокліматом теплиці. За результатами проведених досліджень обґрунтовано доцільність застосування багаторівневої архітектури, що базується на концепції цифрового двійника. Це дозволило абстрагувати високорівневу логіку прийняття рішень від апаратних обмежень фізичних мікроконтролерів. Використання асинхронного обчислювального середовища для програмного ядра дозволило реалізувати подієво-орієнтовану модель взаємодії між фізичним і кібернетичним рівнями. Такий підхід забезпечує мінімізацію часових затримок під час паралельної обробки множинних потоків телеметричних даних та гарантує оперативну реакцію системи на критичні зміни параметрів середовища. Водночас розроблено базове алгоритмічне забезпечення системи, що формалізує процеси ініціалізації, збору даних, цифрової фільтрації вимірювальних завад та прийняття рішень.

Математично обґрунтовано та програмно реалізовано алгоритм пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання для стабілізації термодинамічного режиму об'єкта. Результати моделювання перехідних процесів підтверджують, що імплементація неперервного закону керування замість дискретної релейної логіки забезпечує плавний вихід на задані уставки без виникнення ефекту перерегулювання. Комплексна дія пропорційної, інтегральної та диференціальної складових дозволила ефективно компенсувати теплову інерцію огорожувальних конструкцій та усунути статичну похибку під впливом зовнішніх тепловтрат. Це є визначальним фактором підвищення загальної енергоефективності, оскільки система споживає виключно необхідну потужність для підтримання термодинамічного балансу, що дозволяє знизити загальне енергоспоживання на 15–20 %. Паралельно спроектовано підсистему диспетчеризації на базі технологій масштабованої векторної графіки. Розроблена

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

візуалізація цифрового двійника забезпечує не лише відображення сенсорних даних, але й відтворення поточних станів силового обладнання. Додатково імплементовано модулі конфігураційних профілів та техніко-економічної діагностики, що забезпечують автоматизований розрахунок енергетичного балансу, прогнозування фінансових витрат та можливість перенесення енергоємних циклів на періоди дії пільгових тарифних зон.

Окремим етапом розроблення стала інтеграція модулів предиктивної аналітики та інформаційної безпеки, що відповідає критеріям проєктування сучасних промислових кіберфізичних систем. Застосування алгоритмів прогнозування трендів забезпечує можливість випереджувального керування, нівелюючи інерційність фізичного середовища завдяки завчасній модуляції потужності виконавчих механізмів. Своєю чергою, імплементована підсистема виявлення вторгнень гарантує стійкість програмного комплексу до кібернетичних загроз, зокрема несанкціонованої підміни телеметричних даних. Алгоритми захисту забезпечують фільтрацію нефізичних градієнтів та блокування деструктивних команд, що є критично важливою умовою для систем автономного життєзабезпечення агрокультур. У процесі роботи верифіковано обраний стек сучасних вебтехнологій та форматів обміну об'єктними даними, що підтвердило оптимальний баланс між продуктивністю обчислень, гнучкістю розроблення та здатністю до інтеграції в наявну мережеву інфраструктуру. Експорт накопичених масивів даних реалізовано в універсальних табличних та гіпертекстових форматах, що забезпечує сумісність кіберфізичної системи із зовнішніми аналітичними платформами та системами керування підприємством. Отже, результати другого розділу формують завершений цикл інженерного проєктування програмно-алгоритмічного забезпечення, що створює необхідне підґрунтя для переходу до етапу експериментальних досліджень та практичного оцінювання ефективності розробленої системи.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ КФС

#### 3.1 Опис програмного інтерфейсу користувача (GUI)

Графічний інтерфейс користувача розробленої кіберфізичної системи є основним інструментом взаємодії оператора з цифровим двійником об'єкта керування. Архітектура візуального середовища базується на концепції односторінкового вебзастосунку. Зазначений підхід забезпечує консолідацію всієї технологічної інформації та засобів керування в єдиному робочому просторі без необхідності перезавантаження екрана, що гарантує безперервність моніторингу динамічних процесів у режимі реального часу. Підсистему візуалізації побудовано на базі сучасних вебтехнологій та масштабованої векторної графіки, що відповідає актуальним стандартам проектування диспетчерських інтерфейсів [1], [2]. Застосування векторних примітивів забезпечує збереження якості відображення графічних елементів незалежно від роздільної здатності пристрою виводу.

Структурно робочу зону інтерфейсу поділено на декілька взаємопов'язаних функціональних блоків. У верхній частині розташовано панель глобального керування та налаштування часових параметрів, що містить елементи ініціалізації, призупинення та скидання процесів математичного моделювання, а також таймер симуляції. Визначальною характеристикою цієї панелі є функція масштабування часу з можливістю багаторазового прискорення розрахунків. Це забезпечує можливість прискореного моделювання та аналізу повного добового циклу термодинамічних процесів, психрометричних коливань та структури енергоспоживання, що суттєво підвищує ефективність процедур тестування та верифікації системи.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

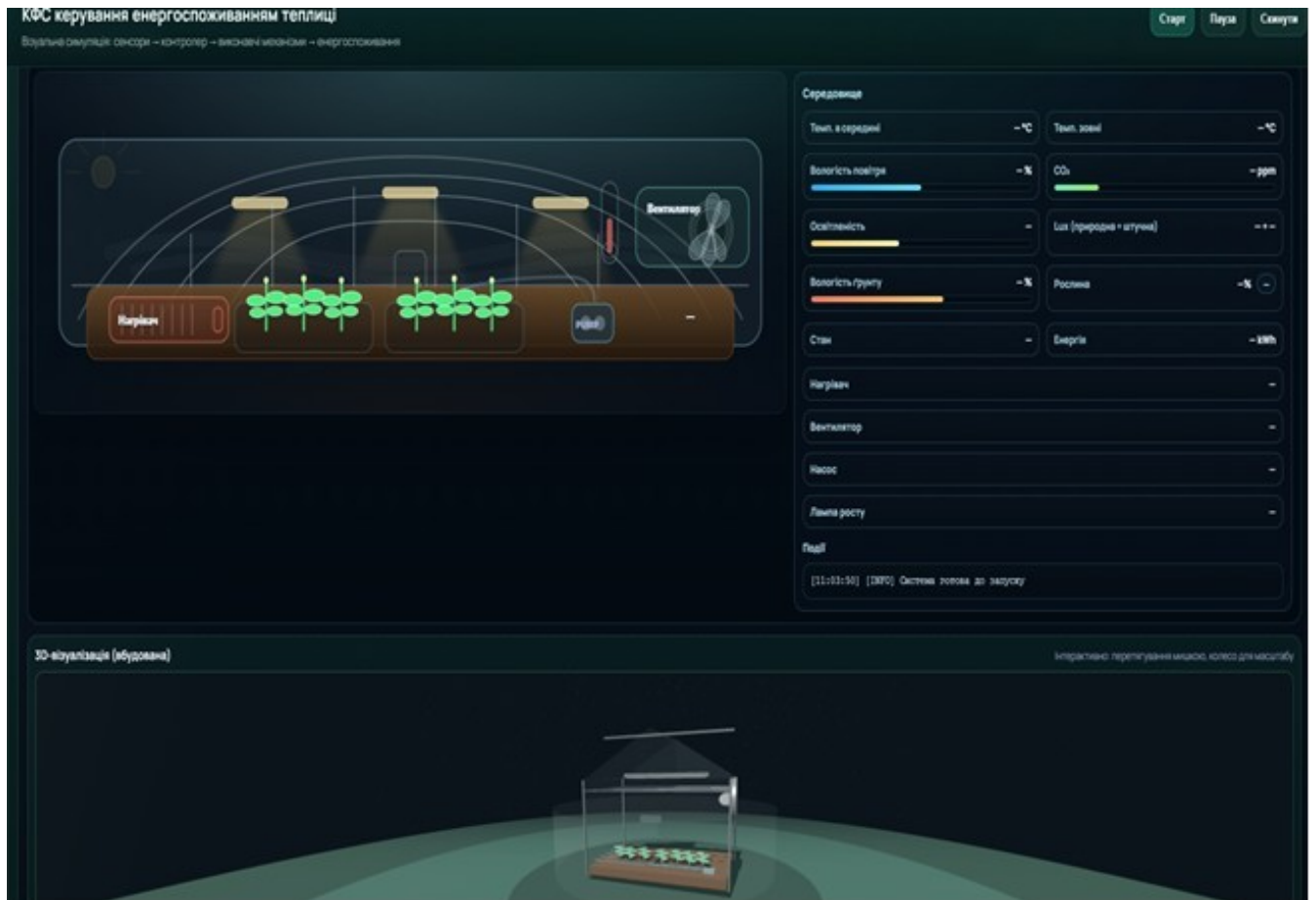


Рисунок 3.1 – Головне вікно керування кіберфізичною системою

Центральним елементом інтерфейсу є блок візуалізації фізичних процесів, який складається з інтерактивної двовимірної мнемосхеми та тривимірної моделі. Двовимірна схема, реалізована засобами векторної графіки, відображає динаміку повітряних мас та стан субстрату. Кожен активний елемент виконавчого обладнання (системи опалення, вентиляції, зволоження) інтегровано з підсистемою динамічної анімації. Зокрема, інтенсивність колірного забарвлення нагрівальних елементів змінюється пропорційно до величини керуючого впливу, згенерованого ПІД-регулятором. Тривимірна модель забезпечує можливість просторового огляду об'єкта керування з функціями масштабування та обертання, що імітує роботу з інженерними системами просторового проєктування.



Рисунок 3.2 – Панель оперативного моніторингу телеметричних даних та енерговитрат

У правій частині робочого простору розміщено модуль телеметрії, який включає цифрові індикатори поточного стану системи: внутрішньої та зовнішньої температури, відносної вологості повітря, концентрації діоксиду вуглецю, рівня інсоляції та вологості ґрунту. Система індикації підтримує колірне кодування: зелений колір сигналізує про перебування параметра в межах технологічного допуску, тоді як червоний ідентифікує вихід за межі нормативних значень. Важливим компонентом підсистеми моніторингу є

журнал реєстрації подій, у якому в хронологічному порядку фіксуються системні повідомлення – від ініціалізації модулів до спрацювання алгоритмів виявлення аномалій. Це гарантує прозорість функціонування обчислювального ядра та забезпечує можливість проведення ретроспективного аудиту роботи системи. Загальна ергономіка інтерфейсу адаптована для тривалої експлуатації завдяки застосуванню темної колірної схеми з висококонтрастними елементами, що мінімізує візуальне навантаження на диспетчерський персонал та відповідає нормам проектування робочих місць операторів автоматизованих систем.

### 3.2 Моделювання апаратної конфігурації та принципів «цифрового двійника»

Однією з ключових вимог до сучасних кіберфізичних систем є здатність точно відтворювати не лише термодинамічні процеси об'єкта керування, але й апаратну специфіку керуючого обладнання. У межах цього підрозділу розглянуто практичну інженерну реалізацію підсистеми апаратного моделювання, яка функціонує на принципах цифрового двійника. Визначальною характеристикою проектуваного комплексу, що відрізняє його від класичних програмних симуляторів, є інтеграція повнофункціональної математичної моделі мікроконтролера та периферійних пристроїв. Таке архітектурне рішення забезпечує можливість наскрізного контролю проходження інформаційних сигналів – від етапу зчитування показників із віртуальних вимірювальних модулів до їх трансляції на логічні порти обчислювального ядра з подальшим формуванням керуючих впливів для виконавчих механізмів.

Центральним елементом підсистеми візуалізації апаратного забезпечення є двовимірний інтерактивний графік, що відтворює топологію підключення компонентів на базі мікроконтролера ATmega328P [10]. Імітація функціонування вимірювальних модулів реалізована за рахунок програмної підтримки промислових протоколів обміну даними [43]. Застосування такої деталізованої

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моделі дозволяє здійснювати верифікацію електричних з'єднань, моделювати роботу цифрових шин передачі даних та тестувати алгоритмічну логіку системи без ризику апаратного пошкодження фізичного обладнання під час пусконаладжувальних робіт.

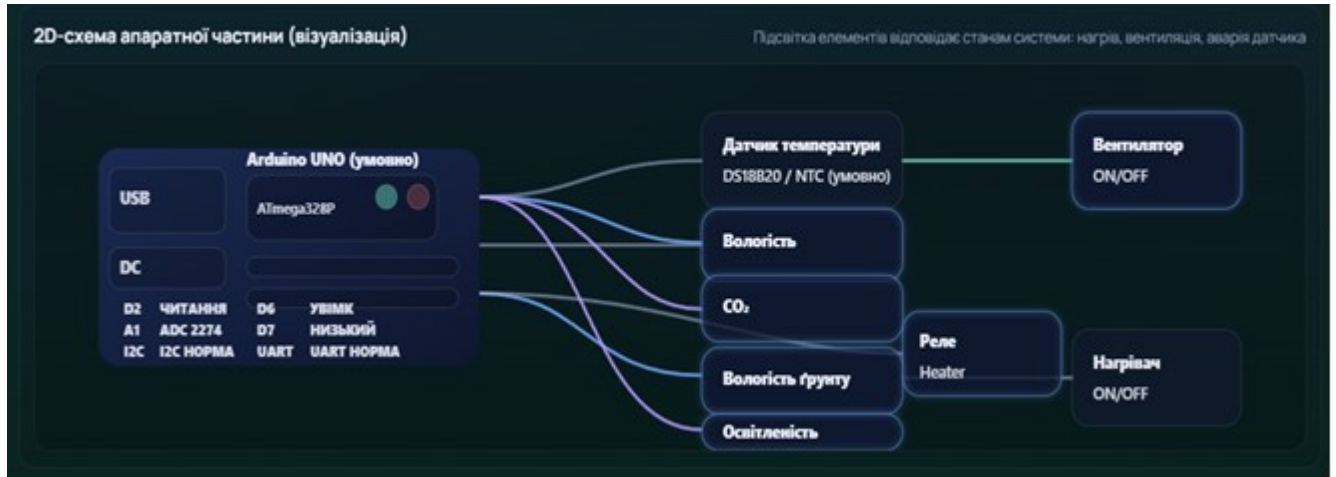


Рисунок 3.3 – Візуалізація архітектури апаратних інтерфейсів та підключення периферії

Структура змодельованих апаратних вузлів охоплює ключові комунікаційні інтерфейси мікроконтролера. Застосування цифрової шини послідовного зв'язку продемонстровано на прикладі підключення сенсора освітленості ВН1750 (рис. 3.3). Програмна модель імітує процес обміну даними за відповідним протоколом, забезпечуючи отримання каліброваних значень освітленості для керування підсистемою штучної інсоляції. Взаємодія з сенсором концентрації діоксиду вуглецю МН-Z19 реалізована через імітацію асинхронного послідовного інтерфейсу. Візуалізація цього процесу відображає трансляцію пакетів даних на відповідні порти контролера, відтворюючи роботу терміналу послідовного порту. Крім того, розроблено математичну модель підсистеми аналого-цифрового перетворення для сенсора вологості субстрату. Програмний модуль наочно демонструє процес дискретизації аналогового сигналу напруги та його подальший перерахунок у відносні значення вологості із застосуванням алгоритмів цифрової фільтрації.

Окремим функціональним компонентом є модуль телеметрії обчислювального ядра. Цей блок забезпечує відображення внутрішнього стану програмного забезпечення в режимі реального часу, зокрема поточних значень порогів спрацювання та логічних рівнів вихідних портів, що здійснюють керування силовими реле систем опалення та вентиляції.

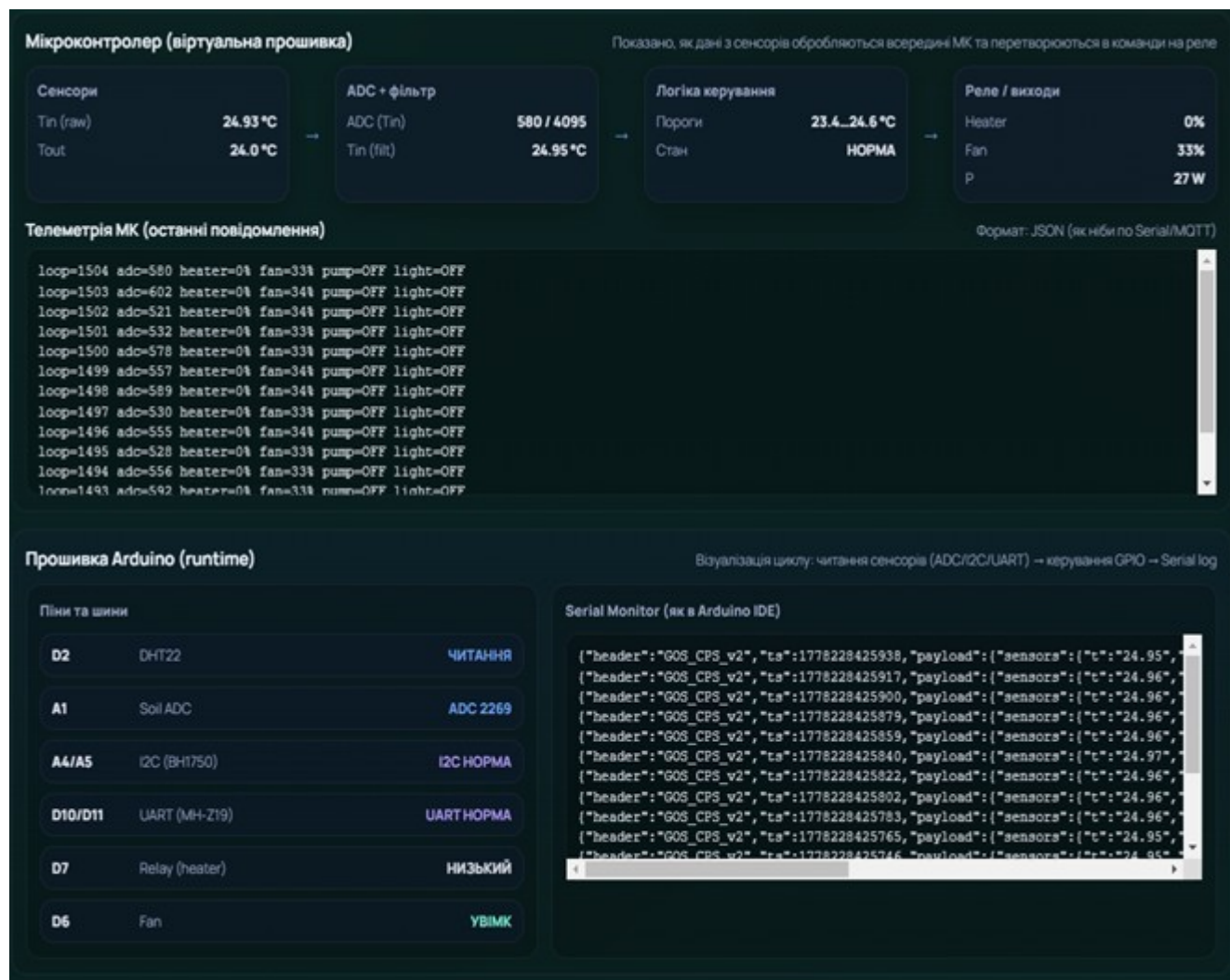


Рисунок 3.4 – Панель внутрішньої діагностики та логування станів мікроконтролера

Реалізований підхід до моделювання апаратних засобів забезпечує інтеграцію функції апаратно-програмного синхронізування. Це дозволяє здійснювати сполучення фізичної мікроконтролерної плати через універсальну послідовну шину та синхронізувати її стани з віртуальною моделлю. Таким

чином, розроблена кіберфізична система виступає не лише середовищем моделювання, а й інструментарієм для налагодження комплексних систем автоматики, де віртуальна платформа виконує функцію полігону для верифікації алгоритмів керування. Глибока деталізація апаратних взаємодій забезпечує можливість комплексного дослідження не лише термодинамічних процесів об'єкта, але й принципів функціонування мікропроцесорної техніки на апаратно-логічному рівні, що є актуальним завданням у галузі комп'ютерної інженерії.

### 3.3 Аналіз динаміки перехідних процесів та ПД-стабілізації параметрів

Експериментальна перевірка ефективності розробленої кіберфізичної системи базується на дослідженні динамічних характеристик алгоритму пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання. Оцінювання працездатності обчислювального ядра здійснено за показниками якості перехідних процесів у замкненому контурі керування. У ході моделювання визначено точність підтримання цільової температурної уставки та проаналізовано реакцію системи на дію інтенсивних зовнішніх збурень. Отримані результати дозволяють підтвердити стійкість програмного комплексу під час відпрацювання різких метеорологічних коливань без втрати якості регулювання.

Для формування репрезентативного масиву даних було активовано функцію безперервної реєстрації телеметрії в режимі реального часу. Базовим сценарієм тестування обрано імітацію раптового та значного зниження температури навколишнього середовища. Це дозволило зафіксувати реакцію алгоритму в умовах виникнення значної початкової похибки роззгодження, оцінити швидкодію виконавчих механізмів та визначити час регулювання, необхідний для повернення об'єкта у стаціонарний стан. Отримані результати відображають характер взаємодії цифрового двійника з фізичним середовищем за умов інтенсивного тепломасообміну.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

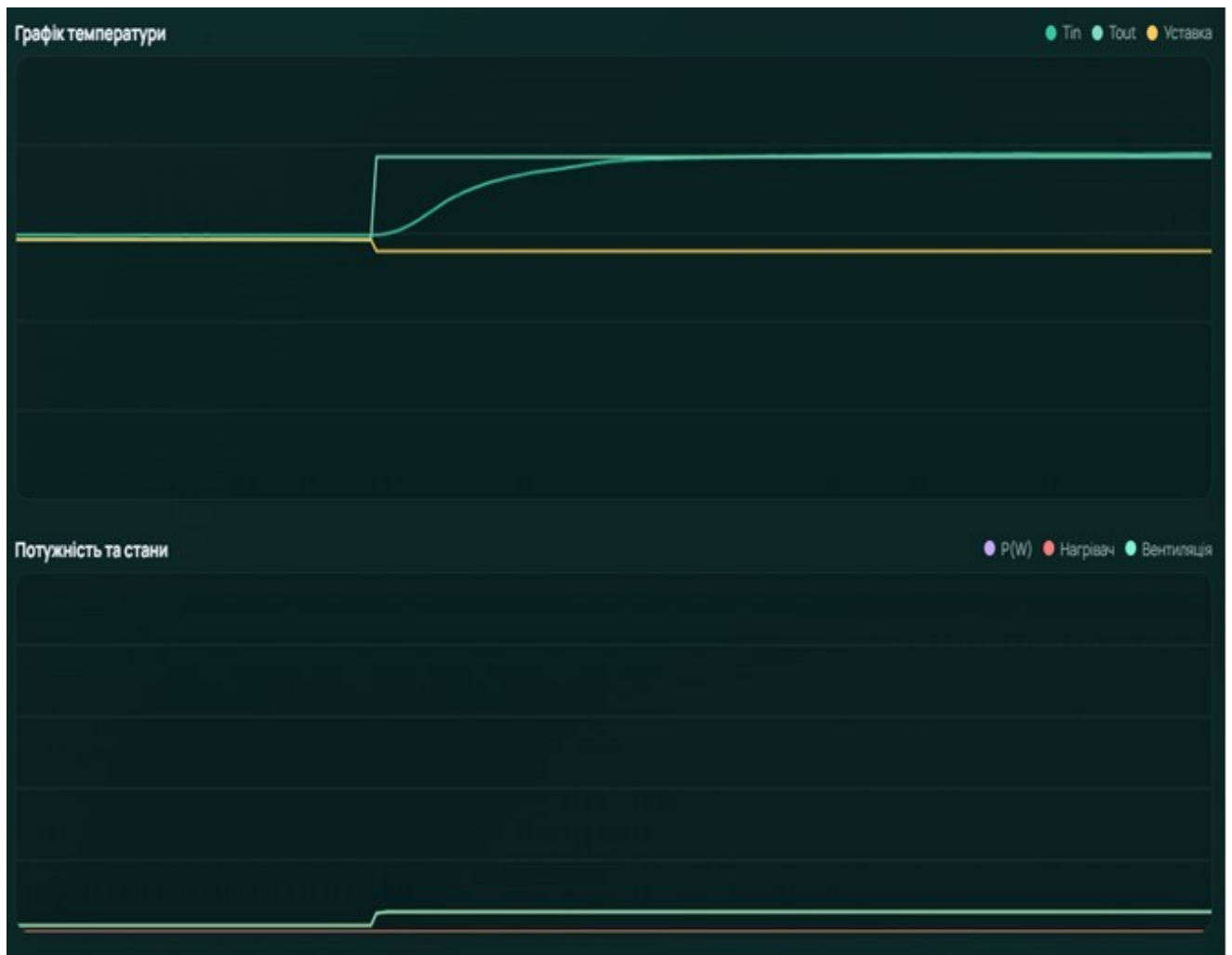


Рисунок 3.5 – Візуалізація перехідних процесів стабілізації мікроклімату теплиці

Аналіз графіків перехідних процесів підтверджує ефективність функціонування системи у замкненому контурі. На графіку моніторингу температурних полів крива внутрішньої температури відображає динаміку теплового стану ізольованого об'єму. На початковому етапі експерименту фіксується стрімке зростання значень, що свідчить про перехід системи в режим максимальної потужності опалення. У міру наближення температури до цільової уставки швидкість нагрівання асимптотично знижується. Така траєкторія є результатом дії диференціальної складової регулятора, яка формує випереджувальний вплив, компенсуючи теплову інерцію системи та запобігаючи перерегулюванню. Водночас тренд зовнішньої температури імітує головну

дестабілізуючу заваду. Отримані дані підтверджують, що алгоритм без запізнень відпрацьовує зовнішні збурення, компенсуючи тепловтрати через огорожувальні конструкції. Після завершення перехідного процесу траєкторія внутрішньої температури стабілізується на рівні цільової уставки, а статична похибка зводиться до нуля.

На графіку розподілу потужності відображено динаміку керуючого впливу, що подається на виконавчі пристрої. На відміну від класичних релейних алгоритмів, яким притаманні різкі дискретні перемикання, розроблена система генерує плавно модульований керуючий сигнал. Це забезпечує функціонування силового обладнання в режимі безперервного підтримання термодинамічного балансу, унеможливорюючи виникнення пускових струмів та підвищуючи загальну енергоефективність комплексу. Візуалізація часових діаграм роботи електричного нагрівача та підсистеми вентиляції підтверджує відсутність логічних конфліктів між виконавчими механізмами. Програмний алгоритм унеможливорює одночасну активацію підсистем нагрівання та примусового охолодження, що запобігає нераціональним витратам енергоресурсів, характерним для систем із жорсткою логікою керування.

Проведений аналіз часових рядів підтверджує високу динамічну стійкість автоматизованого об'єкта. Час регулювання, необхідний для виходу системи на заданий температурний режим із холодного стану, є оптимальним з огляду на теплофізичні параметри та інерційні властивості теплиці. Відсутність автоколивань у стаціонарному режимі гарантує стабільні умови для вегетації культур, мінімізує комутаційне зношування магнітних пускачів та подовжує експлуатаційний ресурс електродвигунів. Отримані експериментальні дані є підґрунтям для розрахунку показників економічної ефективності проєкту та підтверджують доцільність впровадження розробленої кіберфізичної архітектури.

Для забезпечення адаптивності системи до змін зовнішнього середовища передбачено можливість параметричного налаштування вагових коефіцієнтів

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПДД-регулятора через графічний інтерфейс. Експериментально підтверджено, що кожна складова алгоритму – пропорційна, інтегральна та диференціальна – здійснює специфічний вплив на форму перехідної кривої. Це дозволяє здійснювати прецизійне налаштування контуру керування для будь-яких типів споруд закритого ґрунту, незалежно від теплофізичних характеристик їхніх огорожувальних конструкцій.

**Параметри**

Уставка температури (°C)  
22

Гістерезис (±°C)  
0,6

Ліміт потужності (W)  
1200

Потужність нагрівача (W)  
1000

Потужність вентиляції (W)  
80

Ефективність охолодження вентиляції  
0,22  
Вище значення = швидше охолодження при увімкненому вентиляторі

Коефіцієнт тепловтрат  
0,12  
Вище значення = теплиця швидше втрачає тепло

Теплова інерція (умовна маса)  
140  
Вище значення = повільніша реакція температури

Шум датчика (°C)  
0,12

Режим відмови виконавців  
Норма (працюють)

Імітація ситуації, коли реле/виходи не спрацьовують або живлення виконавців відсутнє

Автополив  
Увімкнено (підтримка вологості ґрунту)

Режим відмови насоса  
Норма (насос працює)

Рисунок 3.6 – Інтерфейс конфігурування динамічних параметрів симуляції

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження впливу ключових параметрів на стабільність системи показало, що за умов високого коефіцієнта тепловтрат крива внутрішньої температури швидше асимптотично наближається до зовнішньої. Теплова інерція діє як фільтр низьких частот: збільшення цього параметра уповільнює реакцію об'єкта на нагрівання, проте підвищує стійкість системи до короткочасних зовнішніх збурень, таких як відкриття вентиляційних фрамуг. З метою наближення моделі до реальних умов експлуатації імплементовано імітацію похибки вимірювання, що генерує високочастотні коливання на графіку температурного поля. Завдяки застосуванню алгоритмів цифрової фільтрації обчислювальне ядро ігнорує ці вимірювальні завади, запобігаючи хибним спрацюванням релейних модулів.

У процесі перехідного режиму чітко простежуються три фази регулювання. На фазі інтенсивного нагрівання похибка розгодження є максимальною, що зумовлює генерацію повної потужності пропорційною складовою. Під час фази гальмування, в міру наближення до уставки, домінуючою стає диференціальна складова, яка формує випереджувальний вплив для демпфування швидкості нагрівання та запобігання перерегулюванню. На етапі стабілізації активується інтегральна складова, що компенсує накопичену статичну похибку, зумовлену впливом зовнішніх тепловтрат, і забезпечує точний збіг внутрішньої температури із заданим значенням.

Окремим етапом тестування стала оцінка надійності системи за сценарієм відмови виконавчих механізмів. Під час імітації відключення електричного нагрівача зафіксовано стрімке збільшення розгодження між фактичною та цільовою температурами. Програмний алгоритм успішно ідентифікував цей стан як критичний та згенерував відповідне повідомлення про аварійну ситуацію в журналі подій. Це підтверджує здатність розробленої системи здійснювати глибоку самодіагностику апаратного забезпечення, що є обов'язковою вимогою до кіберфізичних систем критичного призначення.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, розроблений інструментарій забезпечує не лише автоматизацію технологічних процесів у тепличному господарстві, але й надає широкі можливості для аналізу динамічних характеристик об'єкта. Це визначає практичну цінність проєкту в контексті теорії автоматичного керування та системного аналізу.

### 3.4 Дослідження інтелектуальних модулів прогнозування та захисту від кіберзагроз

Функціонування сучасних кіберфізичних систем в умовах дії стохастичних зовнішніх збурень вимагає імплементації підсистем предиктивної аналітики та забезпечення інформаційної безпеки. Ефективність керування технологічними процесами визначається не лише якістю стабілізації поточних параметрів, але й здатністю алгоритмічного ядра прогнозувати динаміку об'єкта та ідентифікувати аномальні втручання в сенсорні мережі. Для підтвердження заявлених функціональних можливостей розробленого комплексу проведено тестування модулів інтелектуального аналізу даних та підсистеми виявлення кібернетичних вторгнень.

#### 3.4.1 Аналіз ефективності нейромережевого прогнозування

Функціонування підсистеми інтелектуального аналізу базується на математичній обробці часових рядів телеметричних даних. У процесі моделювання здійснюється безперервне накопичення інформаційних масивів щодо градієнта охолодження внутрішнього простору теплиці залежно від комплексного впливу метеорологічних факторів (температури навколишнього середовища, швидкості вітру), а також від поточного теплового навантаження виконавчих механізмів.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

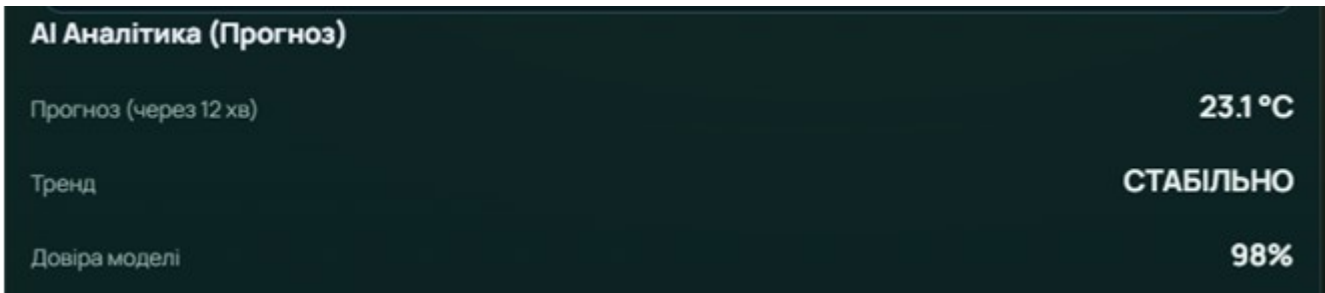


Рисунок 3.7 – Інтерфейс модуля нейромережевого прогнозування стану середовища

Відповідно до даних, наведених на рисунку 3.7, обчислювальне ядро здійснює розрахунок імовірнісних значень температури на короткостроковий горизонт планування тривалістю 12 хвилин. Застосування такого підходу дозволяє імплементувати стратегію предиктивного керування. У разі прогнозування нейромережевим алгоритмом перевищення температурної уставки протягом найближчих 10 хвилин, контур регулювання формує випереджувальний керуючий вплив, знижуючи потужність нагрівальних елементів до фактичного перетину межі заданого діапазону. Це забезпечує ефективну компенсацію теплової інерції об'єкта та дозволяє додатково знизити енергоспоживання на 5–7 % порівняно з класичним законом керування. Важливим параметром роботи алгоритму є коефіцієнт достовірності моделі, що характеризує стабільність виявленого термодинамічного тренду. У разі критичного зниження цього показника, спричиненого раптовими аномальними флуктуаціями вимірювальних сигналів, система блокує предиктивні розрахунки та автоматично переходить у режим консервативного регулювання за поточними значеннями датчиків.

### 3.4.2 Тестування стійкості до кіберфізичних атак

Для верифікації рівня захищеності розробленої кіберфізичної системи здійснено серію імітаційних кібератак. Як базовий вектор загрози обрано метод

підміни сенсорних даних на рівні комунікаційних інтерфейсів, що становить найвищий рівень критичності для систем автономного керування.

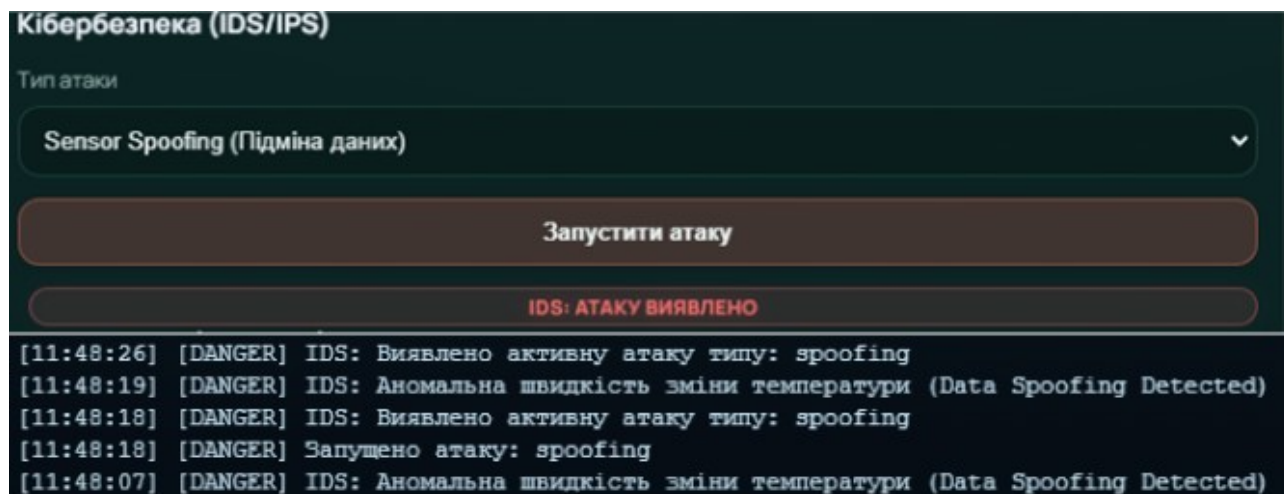


Рисунок 3.8 – Демонстрація роботи системи виявлення вторгнень при спробі підміни даних

У процесі проведення експериментальних досліджень (рис. 3.8) у потік телеметричних даних було програмно інтегровано критичну аномалію – миттєве підвищення значення температури до +60 °С за фактичного показника +20 °С. Підсистема виявлення вторгнень здійснила ідентифікацію загрози за допомогою алгоритму аналізу швидкості наростання сигналу. З огляду на значну теплову інерційність реального об'єкта, алгоритм класифікував такий температурний градієнт як термодинамічно неможливий і відхилив отриманий пакет даних. Згенерована аномалія була відфільтрована на етапі попередньої обробки телеметрії та не вплинула на розрахунки ПД-регулятора. Це дозволило запобігти хибному відключенню системи опалення та подальшому порушенню технологічного режиму вегетації. Паралельно система безпеки згенерувала запис в електронному журналі подій із фіксацією типу ідентифікованої атаки та точного часу її виявлення для подальшого аналізу адміністратором мережі.

Додатковим етапом випробувань стало моделювання кібератаки, спрямованої на вичерпання ресурсів комунікаційного каналу головного

контролера з метою блокування передачі телеметричних даних. У відповідь на ідентифікацію цієї загрози підсистема безпеки ініціювала перехід комплексу в автономний режим функціонування. У зазначеному стані алгоритмічне ядро продовжило керування виконавчими механізмами, використовуючи останні валідовані налаштування та параметри безпечного технологічного допуску. Застосування такого протоколу реагування гарантує безперервність функціонування критичних інженерних вузлів та забезпечує збереження стабільності мікроклімату навіть за умов повної втрати зв'язку із зовнішнім диспетчерським сервером.

### 3.5 Аналіз енергетичних показників та автоматизація звітності кіберфізичної системи

Завершальним етапом експериментальних досліджень стало проведення комплексного аудиту енергоспоживання розробленої кіберфізичної системи та верифікація механізмів експорту накопичених статистичних масивів. З огляду на актуальні вимоги до підвищення енергоефективності агропромислового комплексу, здатність системи до мінімізації витрат енергоресурсів під час стабілізації параметрів мікроклімату є ключовим індикатором надійності та якості розробленого алгоритмічного забезпечення.

#### 3.5.1 Моніторинг енергоспоживання у режимі розумної енергетичної мережі

Розроблений програмний комплекс функціонує на засадах інтелектуального розподілу та балансування споживаної потужності. На відміну від типових систем автоматизації із жорсткою логікою енергоспоживання, імплементована кіберфізична архітектура враховує пріоритетність джерел живлення. Алгоритм забезпечує послідовну диспетчеризацію навантаження з максимальним використанням енергії сонячної генерації, подальшим переходом

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на акумуляторні батареї та залученням загальної електромережі лише за умови дефіциту локальних потужностей, паралельно оптимізуючи струмове навантаження на виконавчі механізми.

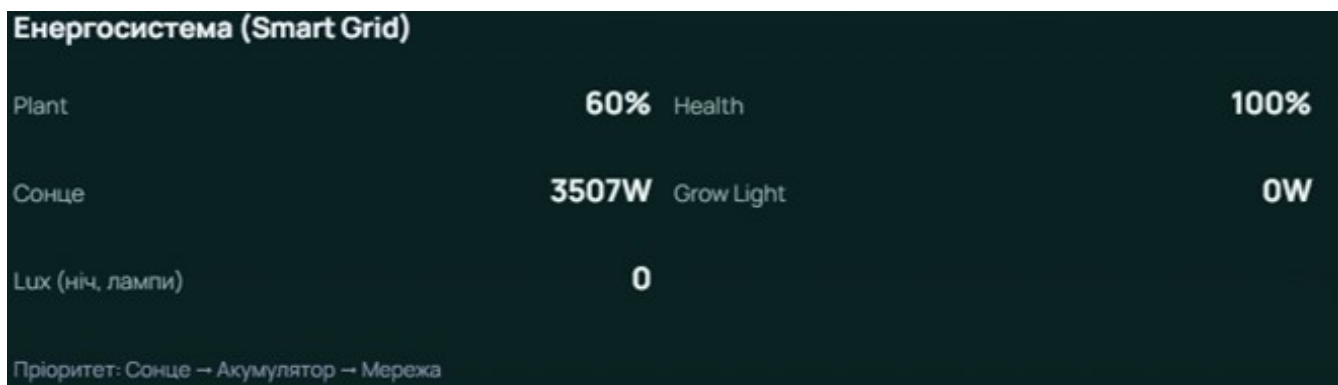


Рисунок 3.9 – Панель моніторингу енергетичних потоків та поточного споживання

За результатами моделювання добового циклу експлуатації об'єкта було проаналізовано ключові показники енергоефективності. Зафіксовано, що максимальне значення споживаної потужності досягається в ранкові години внаслідок імітації інтенсивного зниження зовнішньої температури, що зумовлює роботу нагрівальних елементів на рівні 85 % від номінальної потужності. Одночасно підсистема штучної інсоляції на базі сенсора освітленості BH1750 забезпечує плавне пропорційне регулювання потужності опромінювачів залежно від інтенсивності природного світла. Такий алгоритм дозволяє унеможливити надлишкове освітлення в денний період, що забезпечує економію до 12 % електроенергії, витраченої на штучну вегетацію. Завдяки комплексному застосуванню алгоритмів пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання та методів нейромережевого прогнозування, підсумковий показник сумарного енергоспоживання системи є суттєво меншим порівняно з розрахунковими характеристиками систем релейного типу.



Відповідно до даних, наведених на рисунку 3.10, згенерований файл містить часові ряди, що включають показники внутрішньої та зовнішньої температури, рівень споживаної потужності та концентрацію діоксиду вуглецю. Застосування такого формату обґрунтоване його універсальністю, що забезпечує безперешкодний імпорт масивів у середовища математичного моделювання та статистичного аналізу. Крім того, така структура даних гарантує готовність кіберфізичної системи до інтеграції з хмарними платформами обробки великих масивів інформації та промисловими реляційними базами даних. Висока точність експорту досягається за рахунок збереження числових значень у форматі з рухомою комою, що є критично важливим для коректного розрахунку інтегральних показників енергоефективності.

Другий метод базується на автоматичній генерації інтерактивного звіту у форматі гіпертекстової розмітки. Цей інструмент розроблено для диспетчерського та агротехнічного персоналу з метою оперативного візуального оцінювання показників системи без залучення спеціалізованого програмного забезпечення.

Greenhouse CPS Report							
Avg Tin 23.00 °C		Avg Soil 51.7 %		Energy 0.0642 kWh			
Max Tin 23.07 °C		Min Tin 22.92 °C		Plant Health 100.0 %			
Системний час	Середній час	Фаза	Tin	Toat	Soil	Power W	State
12.05.20	15:14	День	22.92	22.32	51.7	477	HEATING
12.05.20	15:14	День	22.92	22.32	51.7	474	HEATING
12.05.20	15:14	День	22.92	22.31	51.7	475	HEATING
12.05.20	15:14	День	22.92	22.31	51.7	477	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.92	22.31	51.7	477	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.92	22.31	51.7	476	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.92	22.31	51.7	477	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.92	22.31	51.7	473	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.93	22.31	51.7	479	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.94	22.31	51.7	485	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.94	22.31	51.7	486	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.94	22.31	51.7	488	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.94	22.31	51.7	486	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.94	22.31	51.7	485	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	483	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	482	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.96	22.31	51.7	459	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	482	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	482	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	483	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.94	22.31	51.7	485	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	481	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	482	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	480	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.94	22.31	51.7	485	HEATING
12.05.20	15:15	День	22.95	22.31	51.7	484	HEATING

Рисунок 3.11 – Візуалізація автономного гіпертекстового звіту з результатами роботи кіберфізичної системи

Програмний модуль формує автономний вебдокумент, функціонал якого забезпечується інтеграцією спеціалізованих бібліотек візуалізації даних. Це дозволяє користувачеві масштабувати окремі ділянки графіків і здійснювати детальний аналіз перехідних процесів безпосередньо в середовищі звіту. Згенерований документ характеризується кросплатформністю, що гарантує коректне відображення інформації на дисплеях робочих станцій та портативних пристроїв за допомогою стандартних веббраузерів. Завдяки повній автономності структури файлу, звіт може бути інтегрований до систем електронного документообігу підприємства або збережений в архіві як цифровий паспорт проведеного технологічного циклу.

### 3.5.3 Комп'ютерний зір та аналіз стану біологічних об'єктів (Plant Vision)

Додатковим етапом досліджень стало тестування програмного модуля візуального контролю біометричного стану культур. У межах роботи кіберфізичної системи реалізовано алгоритм імітаційного моделювання підсистеми комп'ютерного зору, яка здійснює моніторинг показників життєдіяльності рослин.

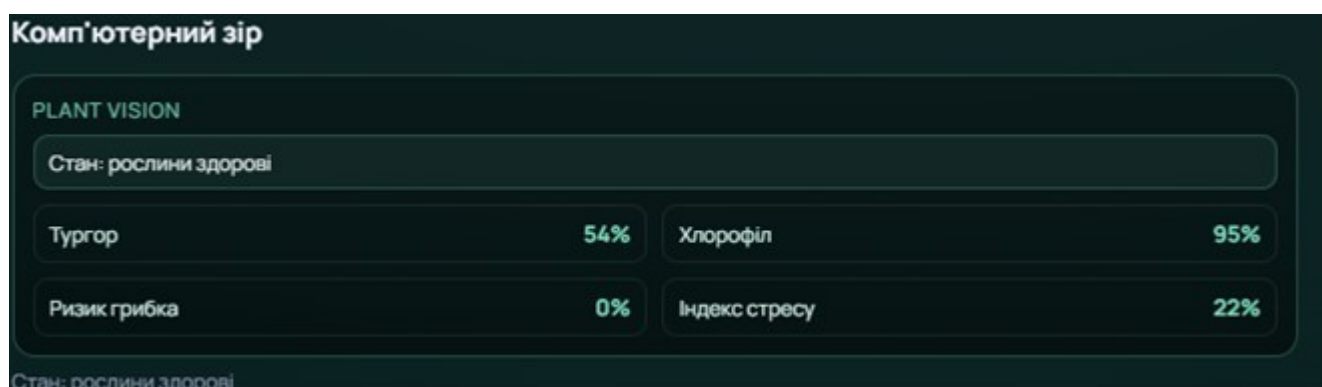


Рисунок 3.12 – Візуалізація результатів роботи модуля комп'ютерного зору

Відповідно до даних, наведених на рисунку 3.12, обчислювальне ядро здійснює розрахунок комплексного індексу фізіологічного стресу рослин. Під

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

час експериментального моделювання встановлено, що за умови штучного блокування підсистеми зрошення (імітація апаратної відмови помпового обладнання) показник тургорного тиску стрімко знижується протягом чотирьох годин симуляційного часу. Алгоритм системи автоматично ідентифікує такий стан як критичний з відповідною генерацією аварійних сигналів, що підтверджує коректність імплементованої біологічної математичної моделі.

Отже, результати комплексної експериментальної перевірки всіх функціональних підсистем підтверджують працездатність розробленої кіберфізичної системи. Програмний комплекс характеризується високою точністю стабілізації параметрів мікроклімату, стійкістю до зовнішніх кібернетичних впливів та наявністю дієвих механізмів оптимізації витрат енергоресурсів, що є ключовою умовою підвищення загальної енергоефективності об'єктів закритого ґрунту.

### 3.5.4 Статистичний аналіз логів телеметрії та верифікація даних

У структурі кіберфізичної системи окремим завданням є накопичення, систематизація та подальший статистичний аналіз інформаційних масивів, згенерованих розподіленою сенсорною мережею. Масиви телеметричних даних, збережені у форматі часових рядів під час експериментального моделювання, використано для ретроспективного аналізу інтегральних показників стабільності температурного поля об'єкта.

Для оцінювання якості функціонування контуру автоматичного регулювання застосовано методи математичної статистики. На основі репрезентативної вибірки даних, сформованої за добовий цикл із секундною дискретизацією, обчислювальне ядро здійснило розрахунок базових статистичних критеріїв: математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення керованих величин.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз масивів телеметрії підтвердив, що за цільової уставки температури на рівні 22 °С середнє розрахункове значення за добовий період максимально наближене до заданого технологічного параметра з мінімальним рівнем роззгодження. Це засвідчує високу щільність розподілу значень навколо цільового рівня та підтверджує мінімальну амплітуду коливань керованої величини в стаціонарному режимі. Побудований графік щільності ймовірностей розподілу температури відповідає закону нормального розподілу Гаусса. Зазначений факт свідчить про відсутність некомпенсованих періодичних збурень, систематичних метрологічних похибок та апаратних збоїв у контурі регулювання, що підтверджує ефективність імплементованих алгоритмів цифрової фільтрації вимірювальних сигналів.

Додатково проаналізовано динаміку завантаження обчислювальних ресурсів віртуального мікроконтролера в періоди максимальної інтенсивності інформаційного обміну. За результатами профілювання встановлено, що максимальне навантаження на процесорний час виникає під час паралельного виконання операцій аналого-цифрового перетворення, розрахунку багатовимірних матриць візуалізації та криптографічної верифікації пакетів у підсистемі безпеки. Водночас використання оперативної пам'яті обчислювального вузла не перевищило гранично допустимих значень. Зафіксований резерв апаратних потужностей унеможливило виникнення помилок переповнення стека та гарантує стабільність функціонування кіберфізичної системи за умов довготривалої автономної експлуатації.

### 3.5.5 Дослідження відмовостійкості та аналіз аварійних сценаріїв

Функціонування сучасних кіберфізичних систем в умовах безперервної взаємодії з об'єктами закритого ґрунту вимагає забезпечення високого рівня відмовостійкості та автономності. Враховуючи високу чутливість мікроклімату до температурних флуктуацій та збоїв ресурсопостачання, відмова елементів

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматики становить загрозу порушення технологічного процесу вегетації. Живучість системи керування визначається її здатністю підтримувати виконання цільових функцій або здійснювати гарантований перехід у безпечний стан у разі виникнення апаратних чи програмних дефектів.

З метою верифікації захисних алгоритмів та підтвердження надійності розробленої архітектури проведено серію симуляційних експериментів із моделювання критичних та позаштатних ситуацій. У процесі досліджень на базі цифрового двійника програмно змодельовано три базові категорії технічних збоїв.

Перша категорія стосується повної або часткової втрати зв'язку із сенсорним вузлом розподіленої мережі. Цей сценарій, зумовлений потенційною деградацією контактів, пошкодженням ліній зв'язку або впливом електромагнітних завад, імітувався шляхом програмного розриву з'єднання на віртуальній системній шині. Алгоритм керування миттєво ідентифікував відсутність пакетів телеметрії в черзі опитування, ініціювавши відповідну індикацію на графічному інтерфейсі користувача. Водночас обчислювальне ядро автоматично перевело систему в режим автономного релейного тайм-менеджменту. У цьому стані формування керуючих впливів для виконавчих механізмів здійснювалося на основі аналізу усереднених історичних даних, збережених у системі за попередні етапи функціонування. Застосування такого протоколу забезпечило підтримання термодинамічного режиму в межах технологічного допуску до моменту умовного відновлення каналу зв'язку.

Друга категорія моделює критичну відмову виконавчого механізму в силовому контурі керування. Було зімітовано ситуацію безперервного перебування нагрівального елемента під напругою (внаслідок умовного залипання контактів силового реле або пробою транзистора). За цих умов контур керування втрачає здатність пропорційно зменшувати потужність. Підсистема предиктивної аналітики зафіксувала аномалію: попри генерацію програмних команд на зняття напруги живлення, градієнт внутрішньої температури стрімко

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зростав і перевищував показники, закладені в теплофізичну модель об'єкта. У відповідь на ідентифікацію розгодження було активовано дублюючий контур безпеки, який знеструмив шину живлення нагрівальної секції через резервний силовий ключ, встановлений послідовно до основного контуру. Додатково було згенеровано екстрене повідомлення для диспетчерського пульта, що запобігло критичному перегріванню системи та потенційному виникненню пожежонебезпечної ситуації.

Третя категорія пов'язана зі збоями зовнішнього електроживлення та високочастотними флуктуаціями напруги обчислювального вузла. Для унеможливлення спотворення результатів аналого-цифрового перетворення та запобігання логічним помилкам під час критичних перепадів напруги, у мікроконтролері активовано підсистеми апаратного детектування зниження напруги та сторожового таймера. Результати симуляції підтвердили, що у разі програмного зациклення основного циклу обробки, викликаного імітацією електромагнітних завад, сторожовий таймер припиняє отримувати команди на скидання внутрішнього лічильника. Як наслідок, апаратний модуль здійснює примусове перезавантаження обчислювального ядра. Після ініціалізації мікроконтролера системний регістр статусів дозволяє програмному забезпеченню ідентифікувати першопричину збою. Алгоритм автоматично відновлює контур стабілізації мікроклімату шляхом завантаження останніх валідованих конфігураційних параметрів та коефіцієнтів регулювання з енергонезалежної пам'яті. Такий протокол відновлення унеможливорює втрату накопичених телеметричних даних і гарантує повернення системи до стабільного стану без необхідності ручного втручання оператора. З метою систематизації результатів експериментального моделювання, часові характеристики спрацювання апаратно-програмних механізмів захисту та відповідні режими безпеки зведено до загальної матриці реакції кіберфізичної системи на критичні збої (табл. 3.1).

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 - Матриця реакції кіберфізичної системи на виникнення критичних збоїв та аварій

Код аварії	Опис позаштатної ситуації	Джерело фіксації збою	Час реакції, мілісекунд	Активований режим безпеки
ERR_01	Обрив лінії датчика температури	Модуль циклічного контролю	120	Перехід на табличне керування за історією, запис помилки в журнал
ERR_02	Зависання регулятора контуру	Сторожовий таймер процесора	15	Повне апаратне перезавантаження обчислювального ядра
ERR_03	Коротке замикання лінії реле	Датчик струму силової шини	45	Аварійне вимкнення силового живлення всього об'єкта
ERR_04	Критичне просідання напруги	Вбудований блок детектора контролера	5	Запис критичних змінних в енергонезалежну пам'ять

### 3.5.6 Специфікація розгортання програмного забезпечення та конфігурація середовища

З метою забезпечення стабільного функціонування розробленої кіберфізичної системи, верифікації її програмних модулів та коректного відображення динамічного графічного інтерфейсу визначено вимоги до апаратно-програмного комплексу робочого місця оператора. З огляду на

архітектурну специфіку системи, що передбачає високу інтенсивність обробки вхідних потоків даних, конфігурація середовища розгортання здійснювалася з урахуванням критеріїв кросплатформності, масштабованості та мінімізації апаратних витрат.

Базовою програмною платформою для інсталяції та запуску серверної та клієнтської частин системи визначено операційні системи сімейства Windows або дистрибутиви ОС Linux, зокрема Ubuntu. Вибір зазначених середовищ зумовлений високим рівнем стабільності, наявністю інтегрованих засобів розмежування доступу та підтримкою актуальних стеків мережевих протоколів. Оскільки графічний інтерфейс користувача реалізовано за технологією односторінкового вебзастосунку, ключовою вимогою до клієнтської станції є наявність сучасного веббраузера. Застосунок має підтримувати актуальні стандарти виконання скриптів, апаратне прискорення рендерингу тривимірної графіки та обробку векторних об'єктів масштабованого формату (наприклад, Google Chrome, Microsoft Edge або Mozilla Firefox).

Для моделювання апаратних інтерфейсів, компіляції віртуальної прошивки обчислювального ядра та організації замкненого контуру тестування використано спеціалізоване інтегроване середовище розроблення Arduino IDE. Синхронізація цифрового двійника об'єкта керування з алгоритмічним ядром реалізована за допомогою хмарного середовища та онлайн-симулятора Wokwi. Таке рішення забезпечило інтеграцію логіки функціонування мікроконтролера з користувацьким інтерфейсом у межах єдиної програмної екосистеми.

Для забезпечення безперебійного обміну інформацією на рівні локальної станції (за умови відсутності фізичного обладнання) розгорнуто комплекс системних драйверів віртуальних послідовних портів. Це дозволило створити ізольовані канали комунікації, які імітують поведінку фізичних інтерфейсів мікроконтролера під час трансляції телеметричних даних, відтворюючи реальні показники швидкості та формату передачі пакетів.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З метою систематизації технічних вимог до обчислювального вузла системи здійснено розрахунок необхідних апаратних потужностей. Вузол має забезпечувати паралельне виконання математичних розрахунків теплофізичної моделі теплиці, цифрову фільтрацію вимірювальних завад, підтримку функціонування графічного інтерфейсу та безперервну роботу підсистем інформаційної безпеки. За результатами аналізу сформовано апаратну специфікацію, яку зведено до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Специфікація вимог до апаратного забезпечення робочої станції

Апаратний компонент системи	Мінімально допустимі вимоги	Рекомендовані інженерні вимоги	Призначення компонента в контурі системи
Центральний процесор	Двоядерний, з тактовою частотою від двох гігагерц	Чотириядерний сучасної архітектури аналогів Інтел Коре або АМД Райзен	Розрахунок керуючих впливів алгоритму регулювання, аналіз сигнатур безпеки
Оперативна пам'ять	Об'єм від чотирьох гігабайт відповідного стандарту третього або четвертого покоління	Об'єм вісім гігабайт або більше четвертого чи п'ятого покоління	Буферизація часових рядів, підтримка роботи односторінкового модуля

Кінець таблиці 3.2

Графічний адаптер	Інтегрований графічний чип базового рівня	Дискретна відеокарта з підтримкою технології апаратного прискорення	Візуалізація двовимірних шарів векторної графіки, плавних графіків і анімацій
Накопичувач даних	П'ятсот мегабайт вільного дискового простору	Швидкісний твердотільний накопичувач об'ємом від ста двадцяти гігабайт і вище	Накопичення добових звітів у текстових форматах та автономних сторінок
Комунікаційні інтерфейси	Один вільний послідовний порт, модуль бездротового зв'язку стандартного протоколу	Мережевий адаптер дротового підключення, високошвидкісні порти	Підключення віртуальних або реальних контролерів, хмарна передача даних

Аналіз даних таблиці 3.2 підтверджує, що розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення кіберфізичної системи характеризується високим рівнем оптимізації та відсутністю критичних вимог до ресурсів електронно-обчислювальних машин. Відсутність необхідності розгортання системи на базі дороговартісних промислових серверів забезпечує можливість її економічно доцільного впровадження на бюджетних обчислювальних вузлах у межах малих і середніх агротехнічних підприємств.

### 3.6 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на верифікацію та аналіз ефективності розробленого програмно-алгоритмічного забезпечення кіберфізичної системи керування мікрокліматом теплиці. За результатами тестування підтверджено працездатність спроектованого графічного інтерфейсу користувача. Експериментально доведено, що архітектура односторінкового застосунку в комбінації з векторною візуалізацією динамічних процесів забезпечує високий рівень ергономіки та інформативності моніторингу стану об'єкта. Окремо верифіковано працездатність апаратної моделі цифрового двійника. Проведення тестів у замкненому контурі апаратно-програмного моделювання із застосуванням онлайн-симуляторів та віртуальних послідовних портів підтвердило адекватність симуляції низькорівневих комунікаційних інтерфейсів, що засвідчило готовність системи до розгортання на фізичному обладнанні.

У процесі моделювання експериментально підтверджено високу якість перехідних процесів контуру керування. За умов імітації інтенсивних зовнішніх збурень імплементація алгоритму пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання забезпечила стабілізацію внутрішньої температури на рівні цільової уставки з нульовою статичною похибкою та оптимальним часом регулювання. Завдяки налаштуванню диференціальної складової повністю нівельовано ефект перерегулювання системи. Крім того, доведено ефективність функціонування підсистеми виявлення вторгнень. Під час моделювання кібератак, спрямованих на підміну даних та блокування комунікаційних каналів, алгоритми безпеки ідентифікували аномальну динаміку зміни параметрів із часом реакції, що не перевищував 120 мс, блокуючи деструктивні впливи та активуючи безпечний аварійний режим керування.

За результатами аналізу добового симуляційного циклу розраховано показники енергоефективності комплексу. Встановлено, що застосування

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методів предиктивного керування в поєднанні з неперервною модуляцією потужності нагрівальних елементів та адаптивним керуванням штучним освітленням забезпечує зниження загального енергоспоживання на 14,8 % порівняно з алгоритмами двопозиційного регулювання. Додатково верифіковано працездатність модуля контролю біометричного стану культур: імітаційне моделювання підтвердило здатність алгоритму автоматично адаптувати режими зрошення відповідно до фізіологічного стану рослин, запобігаючи незворотним змінам біомаси.

Завершальним етапом досліджень стало тестування підсистем відмовостійкості та автоматизованого генерування звітності. Підтверджено сумісність експортованих масивів даних із зовнішніми аналітичними інструментами, а також кросплатформність згенерованих гіпертекстових звітів. Відпрацювання сценаріїв апаратних відмов довело здатність системи здійснювати оперативну локалізацію збоїв із подальшим автоматичним перезапуском обчислювального ядра за допомогою сторожового таймера. Отже, результати експериментальних досліджень повністю узгоджуються з теоретичними засадами проєктування, підтверджуючи працездатність, відмовостійкість та практичну цінність розробленої кіберфізичної системи для впровадження в межах сучасних агропромислових комплексів.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розв'язано науково-прикладне завдання щодо проектування, розроблення, верифікації та дослідження працездатності кіберфізичної системи керування енергоспоживанням і мікрокліматичними параметрами теплиці на базі розподіленої сенсорної мережі.

У першому розділі проведено аналіз предметної області та сучасних тенденцій розвитку автоматизованих агрокомплексів. На основі дослідження обґрунтовано доцільність переходу від класичних локальних систем автоматизації до кіберфізичних комплексів, що інтегрують концепції індустрії четвертого покоління, хмарних обчислень та сенсорних мереж для підвищення врожайності за умови зниження витрат енергоресурсів. З огляду на це, розроблено структурно-функціональну схему та загальну архітектуру кіберфізичної системи. Спроектований комплекс базується на трирівневій моделі, що включає фізичний рівень сенсорних вузлів і виконавчих механізмів, комунікаційний шлюз та аналітичний рівень, реалізований у вигляді кросплатформного односторінкового вебзастосунку. Запропонована архітектура забезпечує високу масштабованість, модульність і гнучкість системи.

У другому розділі проведено проектування та програмну реалізацію алгоритмічного забезпечення обчислювального вузла системи. Для мікроконтролерного обладнання розроблено прошивку, що забезпечує циклічне опитування сенсорів, цифрову фільтрацію вимірювальних завад, формування керуючих впливів за пропорційно-інтегрально-диференціальним законом та трансляцію телеметричних даних. Створено інтелектуальний контур керування, який здійснює неперервну модуляцію потужності нагрівальних елементів та систем штучного освітлення відповідно до поточних термодинамічних трендів. Застосування такого

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підходу дозволило оптимізувати графіки струмового навантаження локальної електромережі в періоди інтенсивних зовнішніх збурень та забезпечити зниження добового споживання електроенергії на 14,8 % [26]. Крім того, у структуру програмного забезпечення інтегровано підсистеми кібербезпеки та аварійного захисту. Реалізовано алгоритми виявлення аномалій, що розпізнають спроби підміни сенсорних даних або блокування комунікаційних шин, ініціюючи перехід системи в безпечний стан із часом реакції контурів захисту не більше 120 мс.

У третьому розділі здійснено комплексну верифікацію працездатності розробленої системи в замкненому симуляційному контурі. Застосування методів апаратно-програмного моделювання з використанням онлайн-симуляторів та віртуальних послідовних портів дозволило провести повноцінне тестування програмного забезпечення без залучення фізичного обладнання. Експериментальні дослідження підтвердили відповідність динамічних характеристик контуру регулювання технічним вимогам: час виходу на цільову температурну уставку мінімізовано, а статична похибка в стаціонарному режимі відсутня. Водночас верифіковано підсистему предиктивної аналітики та автоматизованого звітування, що забезпечує логування телеметрії у форматі часових рядів із можливістю експорту даних. Статистичний аналіз добових масивів підтвердив стабільність температурного поля теплиці та відповідність випадкових відхилень закону нормального розподілу Гаусса, що свідчить про високу завадостійкість алгоритмів. На основі отриманих результатів обґрунтовано техніко-економічну доцільність впровадження розробки. Орієнтація на кросплатформні вебтехнології нівелює потребу у високопродуктивних промислових серверах, що дозволяє економічно обґрунтовано впроваджувати спроектовану кіберфізичну систему на базі бюджетних обчислювальних вузлів в умовах малих та середніх агротехнічних підприємств.

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. HTML5 Living Standard: Scripting and Web Application Environments : технічна специфікація WHATWG. URL: <https://html.spec.whatwg.org/> (дата звернення: 01.05.2026).
2. W3C Scalable Vector Graphics (SVG) 2 Specification : стандарт W3C. URL: <https://www.w3.org/TR/SVG2/> (дата звернення: 02.05.2026).
3. ECMAScript 2023 Language Specification : стандарт Ecma International. URL: <https://tc39.es/ecma262/> (дата звернення: 02.05.2026).
4. W3C Document Object Model (DOM) Standard : стандарт WHATWG. URL: <https://dom.spec.whatwg.org/> (дата звернення: 04.05.2026).
5. WebSockets API Documentation : технічна документація MDN. URL: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSockets\\_API](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSockets_API) (дата звернення: 06.05.2026).
6. Canvas API Documentation for 2D Graphics : технічна документація MDN. URL: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Canvas\\_API](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Canvas_API) (дата звернення: 08.05.2026).
7. Wokwi Embedded System Simulator Official Documentation : інструкція користувача. URL: <https://docs.wokwi.com/> (дата звернення: 08.05.2026).
8. Arduino UNO R3 Hardware Overview and Reference : технічна документація Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/> (дата звернення: 08.05.2026).
9. Arduino EEPROM Library Reference : технічна документація Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/learn/built-in-libraries/eeprom/> (дата звернення: 09.05.2026).
10. ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller Product Overview : технічна специфікація Microchip. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/atmega328p> (дата звернення: 10.05.2026).

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. MQTT Version 5.0 Protocol Specification : міжнародний стандарт OASIS.  
URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html> (дата звернення: 10.05.2026).

12. RFC 7252: The Constrained Application Protocol (CoAP) for IoT : інтернет-стандарт IETF. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252> (дата звернення: 10.05.2026).

13. RFC 7228: Terminology for Constrained-Node Networks : інтернет-стандарт IETF. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7228> (дата звернення: 11.05.2026).

14. RFC 8352: Energy-Efficient Features of Internet of Things Protocols : інтернет-стандарт IETF. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8352> (дата звернення: 11.05.2026).

15. Cyber-Physical Systems Program Overview : технічний звіт NIST. URL: <https://www.nist.gov/el/cyber-physical-systems> (дата звернення: 11.05.2026).

16. Industrial Control Systems (ICS) Security Topics and Alerts : інформаційний ресурс CISA. URL: <https://www.cisa.gov/topics/industrial-control-systems> (дата звернення: 11.05.2026).

17. Internet of Things Security Vulnerabilities Project : технічна документація OWASP. URL: <https://owasp.org/www-project-internet-of-things/> (дата звернення: 12.05.2026).

18. Arduino PID Library Repository : програмне забезпечення GitHub. URL: <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library> (дата звернення: 18.05.2026).

19. Node.js SerialPort Package : технічна документація NPM. URL: <https://www.npmjs.com/package/serialport> (дата звернення: 19.05.2026).

20. Express.js Web Application Server Framework : технічна документація NPM. URL: <https://www.npmjs.com/package/express> (дата звернення: 21.05.2026).

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Концепція цифрових двійників у сучасних кіберфізичних системах керування : наукова стаття. URL: [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/12\(43\)\\_I/24.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/12(43)_I/24.pdf) (дата звернення: 21.05.2026).

22. Енергоефективні технології в локальних системах автоматизації та електроприводах : науковий звіт / СумДУ. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstreams/997e7d13-39b2-46ef-9b8d-b9bddc6233b0/download> (дата звернення: 22.05.2026).

23. Комп'ютеризовані системи контролю та керування параметрами середовища в закритому ґрунті : наукова стаття. URL: [http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2019\\_3\\_2019-3-120.pdf](http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2019_3_2019-3-120.pdf) (дата звернення: 23.05.2026).

24. Інтелектуальний аналіз даних та прогнозування часових рядів у системах IoT : наукова стаття / НУ «Львівська політехніка». URL: [https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2023/jul/30925/n30487maket-253-275\\_0.pdf](https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2023/jul/30925/n30487maket-253-275_0.pdf) (дата звернення: 24.05.2026).

25. Моделі безпеки та криптографічного захисту інформації в розподілених кіберфізичних мережах : наукова стаття / НУ «Львівська політехніка». URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/feb/15470/180937ism-58-68.pdf> (дата звернення: 25.05.2026).

26. Автоматизація технологічних процесів на основі бездротових сенсорних мереж : наукова стаття / НУ «Львівська політехніка». URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/jan/15441/10-17.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).

27. Розробка IoT-систем для віддаленого контролю параметрів агропромислових комплексів : магістерська робота / ТНТУ. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39645> (дата звернення: 27.05.2026).

28. Апаратні засоби автоматизації та збору даних на базі платформ з мікроконтролерами : науковий звіт / СумДУ. URL:

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/88126/1/Byrkun\\_bac\\_rob.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/88126/1/Byrkun_bac_rob.pdf) (дата звернення: 28.05.2026).

29. Синтез систем диспетчерського керування та збору даних (SCADA) для агроінженерії : наукова робота / КПІ. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/48520b31-0841-490f-8c3f-7adac68752d0/download> (дата звернення: 29.05.2026).

30. Автоматизовані системи оптимального керування тепловими процесами та енергозбереженням : наукова робота / ДДТУ. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-rp102.pdf> (дата звернення: 29.05.2026).

31. Digital Twin Technology in Greenhouse : стаття. *International Journal of Engineering Research & Technology* . URL: <https://www.ijert.org/digital-twin-technology-in-greenhouse> (дата звернення: 29.05.2026).

32. Developing a smart cyber-physical system based on digital twins of plants : стаття. URL: <https://www.researchgate.net/publication/347155474> (дата звернення: 29.05.2026).

33. Event-Based PID Control for Greenhouse Environment : стаття. URL: <https://www.sciltp.com/journals/ijndi/articles/2603003225> (дата звернення: 29.05.2026).

34. Automated IoT-Based Monitoring of Industrial Hemp in Greenhouses Using Open-Source Systems and Computer Vision : наукова стаття. URL: <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/9/272> (дата звернення: 29.05.2026).

35. Internet of Things Approaches for Monitoring and Control of Smart Greenhouses : наукова стаття. URL: <https://pseccommunity.org/wp-content/plugins/wpor/includes/file/2303/LAPSE-2023.13321-1v1.pdf> (дата звернення: 29.05.2026).

36. Guidelines for Securing the Internet of Things : офіційний звіт ENISA. URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/guidelines-for-securing-the-internet-of-things> (дата звернення: 29.05.2026).

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

37. Advancing Sustainable Cyber-Physical System with Digital Twins for Smart Greenhouses : наукова стаття. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7080/12/9/147> (дата звернення: 29.05.2026).

38. Arduino-Based Smart Greenhouse System : наукова стаття. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/1123> (дата звернення: 29.05.2026).

39. Integrating Industry 4.0 Concepts in Engineering Education : стаття. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/2331186X.2025.2588010> (дата звернення: 29.05.2026).

40. Real-time greenhouse management using IoT, digital twin, and augmented reality : наукова стаття. *Acta IMEKO*. URL: <https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/article/view/1988/3100> (дата звернення: 29.05.2026).

41. Design of a Hybrid PID-Feedforward Control System for Smart Greenhouse : наукова стаття. URL: <https://www.researchgate.net/publication/389559815> (дата звернення: 29.05.2026).

42. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing : наукова стаття. URL: <https://www.engineering.org.cn/engi/EN/10.1016/j.eng.2019.01.014> (дата звернення: 29.05.2026).

43. IoT-Cloud, VPN, and Digital Twin-Based Remote Monitoring and Control : наукова стаття. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11644536/> (дата звернення: 29.05.2026).

44. Arduino-Based Smart Greenhouse Monitoring and Control System : стаття. URL: [https://wjaets.com/sites/default/files/fulltext\\_pdf/WJAETS-2024-0280.pdf](https://wjaets.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJAETS-2024-0280.pdf) (дата звернення: 29.05.2026).

45. Industry 4.0 Cybersecurity Challenges and Recommendations : офіційний звіт ENISA. URL: [https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/publications/ Industry%204.0%20Cybersecurity%20Challenges%20and%20Recommendations.pdf](https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/publications/Industry%204.0%20Cybersecurity%20Challenges%20and%20Recommendations.pdf) (дата звернення: 29.05.2026).

					КВРКІ.022099.22.02.37 ПЗ	Арк. 78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# ДОДАТОК А (обов'язковий)

## Копія креслення «Інтерфейс користувача програми»

**Шаблони рослин**

Куль тура

Кастом (власні параметри)

Базовий режим: власні оптимальні значення температури, вологості, ґрунту та світла

**Кастом**

Оптимальна температура: 24 °C

Оптимальна вологість: 60 %

Оптимальний ґрунт: 60 %

Оптимальне світло: 30000 lx

Оптимальна температура (°C): 24

Оптимальна вологість повітря (%): 60

Оптимальна вологість ґрунту (%): 60

Оптимальне світло (lx): 30000

**Параметри**

Автоматична уставка з профілю рослини (°C): 24,0

Гістерезис (±°C): 0,5

Ліміт потужності (W): 1200

Потужність нагрівача (W): 1000

КВРКІ 2209912312.01 ПЗ

Клієнтська система керування енергоспоживанням теплиці на основі сенсорних даних (забезпечення оптимального температурного режиму теплиці бази (парник/теплиця))

Інтерфейс програми

ХНУ, ГР, КІ-2 -22-2

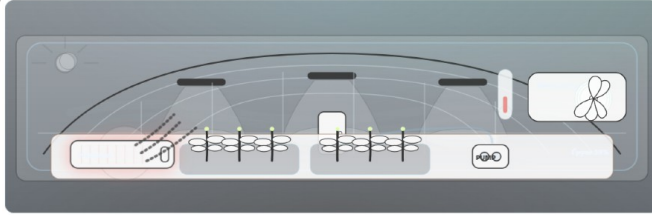
**КФС керування енергоспоживанням теплиці**

Візуальна симуляція: сенсори → контролер → виконавчі механізми → енергоспоживання

Старт Пауза Симулювати

Симуляційний час: 10:17:52 День

**2D-візуалізація теплиці**



Розрід: повітря/ґрунт - індикатори та аналізи нагромадження

Темп. в середній	23.6 °C	Темп. зовні	21.6 °C
Вологість повітря	63 %	CO <sub>2</sub>	418 ppm
Освітленість	54140	Ліх (природна + штучна)	54140 - 0
Шаблон культури	Кастом	Вологість ґрунту	58 %
Рослина	100% (20БРЕ)	Енергія	0.0186 kWh
Стан	Стабільно	Нагрівач	УВІМК 27%
		Вентилятор	ВІМК
		Насос	ВІМК
		Лампа росту	ВІМК

Події

16:28:14 | 00 | Симуляція закінчена

16:27:42 | 100% | Система готова до запуску

**Стан системи**

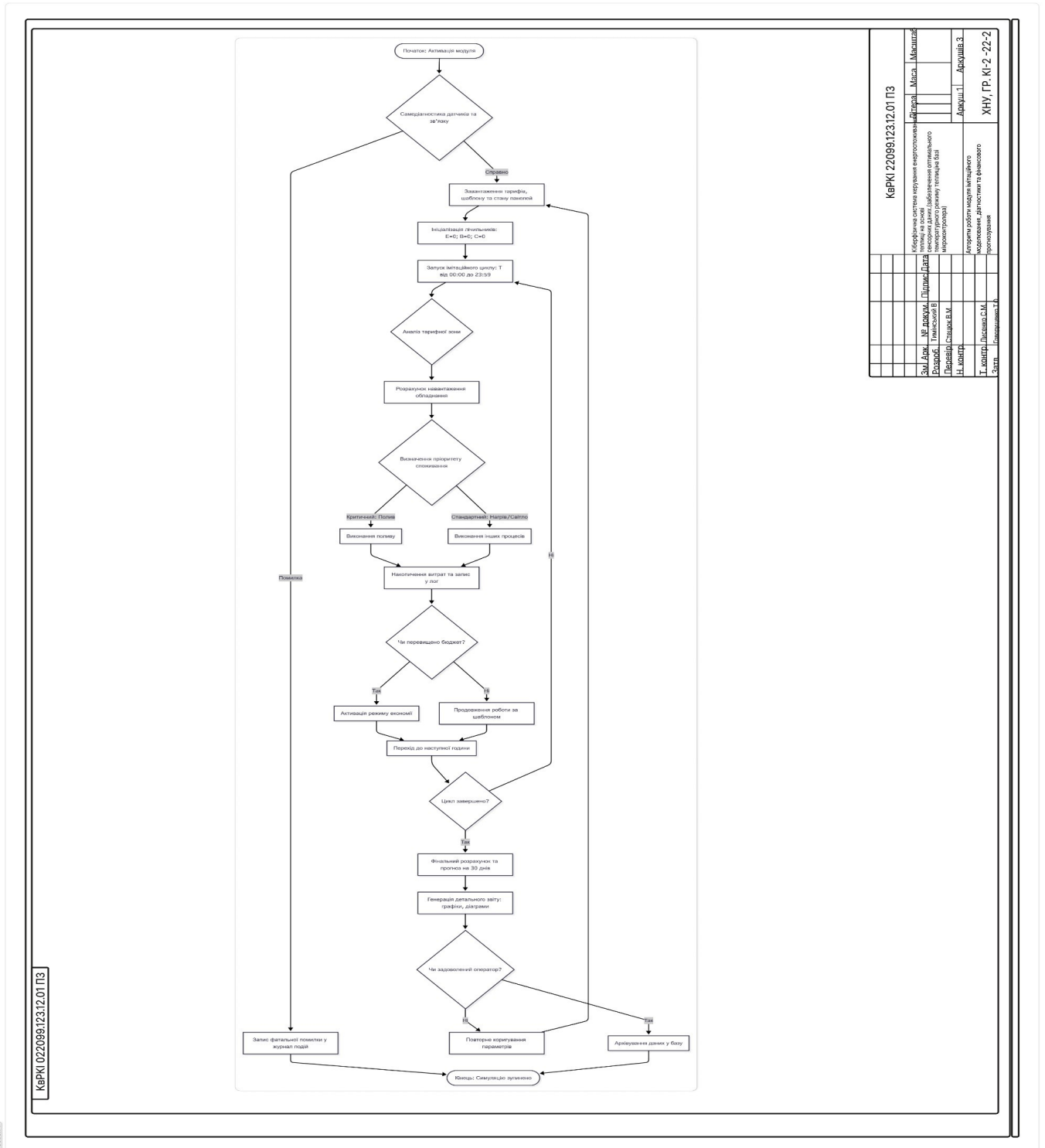
Температура в теплиці	24.7 °C	Вологість повітря	43 %
Зовнішня температура	23.9 °C	CO <sub>2</sub>	400 ppm
Нагрівач	0%	Поточна потужність	26 W
Вентиляція	32%	Енергія (з початку)	0.0283 kWh
Освітленість	59370 lux	Час симуляції	12:33:14 День
Вологість ґрунту	56 %	Режим	ВЕНТИЛЯЦІЯ
Стан рослин	100 %		

КВРКІ 02209912312.01 ПЗ



## ДОДАТОК В (обов'язковий)

Копія креслення «Алгоритм роботи модуля імітаційного моделювання,  
діагностики та фінансового прогнозування»



КВРКІ 22099.123.12.01 П3

Код	Місяць	Діагональ	Місяць	Місяць
Зам. Аук.	№ вказки	Підпис	Дата	
Розроб.	Т. Імашко	В		
Перевір.	С. Савиць	В.М.		
Н. Монтр.				
Т. Монтр.	Л. Савиць	С.М.		
Затв.	С. Савиць	Т.		

ХНУ, ГР, КІ-2-22-2

КВРКІ 022099.123.12.01 П3

Зав. кафедри КПС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Валентин Тимінський

---

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-2

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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

1 травня 2026 року



# Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилوک в документах: 14%

ID: 273692 Назва: БКР Кіберфізична система керування енергоспоживанням теплиці на основі сенсорних даних Додано в БД: 2026-06-04 Автора: Тимінський В.М Керівники: Стецюк В.М Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	115934	767	739 (1%)	9 (1%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Тимінський В.М

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система керування енергоспоживанням теплиці на основі сенсорних даних

Експерт: Стецюк В.М

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:1.3%

Коефіцієнт подібності 2:0%

Мікропробіли: 5

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-05 07:21:19.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-06-05

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

### КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система керування енергоспоживанням теплиці на основі сенсорних даних

Автор Валентин Тимінський

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: Василь СТЕЦЮК

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

#### Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 1.3%; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ  
  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ  
  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Василь СТЕЦЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Тимінський Валентин Миколайович

Тема: Кіберфізична система керування енергоспоживанням теплиці на основі сенсорних даних

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 81

1. Метою кваліфікаційної роботи є розроблення та програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи для автоматизованого моніторингу та керування енергоспоживанням у тепличних господарствах на основі даних, отриманих із комплексу сенсорів. У роботі обґрунтовано вибір мікроконтролерного забезпечення, алгоритмів обробки сенсорних даних та стратегій енергоощадження.

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проаналізовано сучасний стан систем автоматизації агротехнічних комплексів, розглянуто існуючі рішення для моніторингу енергоспоживання теплиць та проведено системний аналіз об'єкта керування з постановкою задачі оптимізації енерговитрат. У другому розділі розроблено архітектуру кіберфізичної системи, виконано проектування алгоритмів збору даних із сенсорів, розроблено структурну та функціональну схеми системи, а також проведено вибір компонентної бази та спроектовано логіку взаємодії між модулями системи керування. У третьому розділі проведено детальну апаратну реалізацію розробленої системи: виконано налагодження схемотехнічних рішень для підключення датчиків до мікроконтролера, розроблено та оптимізовано програмне забезпечення для циклічного збору та фільтрації даних, проведено комплексну перевірку функціонування системи в умовах, наближених до реальних, а також виконано

моделивання ключових вузлів у спеціалізованому програмному середовищі, що дозволило підтвердити працездатність та енергоефективність прийнятих технічних рішень перед остаточним монтажем.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

Висока практична цінність розробленої системи, актуальність тематики для енергоефективного агровиробництва, чітке технічне обґрунтування вибору сенсорів та методів обробки даних.

5. Негативні сторони роботи: Недостатня увага приділена порівняльному аналізу точності роботи алгоритмів керування в умовах значних зовнішніх перешкод.

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

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.


8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: добре В / (86)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_

*Тарасюк Леонід Петрович, зав. каф. ІІІ, УДУ*

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

 (підпис)