

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Володимир ЄРЕМЕНКО
« ____ » _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології»**

зі спеціальності 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»

**на тему: «Інформаційно-вимірювальна система параметрів мікроклімату в
приміщеннях для тварин чутливих до зміни терморегуляції свого тіла»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПІ-41мп
Герасимчук Андрій Андрійович _____

Керівник:

Професор, д.т.н., доцент
Барилко Сергій Віталійович _____

Консультант з розділу «Розробка СТАРТАП-проектів»:

Професор, д.е.н.
Вовк Ольга Миколаївна _____

Рецензент:

доцент, к.т.н.
Петрик Валентин Федорович _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 175 Інформаційно-вимірювальні технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Герасимчуку Андрію Андрійовичу

1. Тема дисертації «Інформаційно-вимірювальна система параметрів мікроклімату в приміщеннях для тварин чутливих до зміни терморегуляції свого тіла», науковий керівник дисертації д.т.н., професор Барилко Сергій Віталійович, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2025 р. № 4793-с
2. Термін подання студентом дисертації 18 грудня 2025 р.
3. Об'єкт дослідження – процес вимірювання та автоматизованого підтримання параметрів мікроклімату в приміщеннях для тварин, чутливих до зміни терморегуляції свого тіла.
4. Предмет дослідження – розробка комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу та регулювання параметрів мікроклімату в приміщеннях для тварин чутливих до зміни терморегуляції свого тіла.

5. Вихідні дані: діапазон вимірювання температури – 10 – 50 °C; діапазон вимірювання вологості – 30-95%; діапазон вимірювання освітленості 0-500 лк; похибка вимірювання 7%.

6. Перелік завдань, які потрібно розробити.

6.1. Теоретичні дослідження.

6.1.1 Проведення аналізу існуючих інформаційно-вимірювальних систем параметрів для мікроклімату в приміщеннях для тварин чутливих до зміни терморегуляції свого тіла.

6.1.2 Провести огляд різних засобів вимірювань, які можуть бути використані, як пристрої вимірювання температури.

6.1.3 Провести огляд різних засобів вимірювань, які можуть бути використані, як пристрої вимірювання вологості.

6.1.4 Провести огляд різних засобів вимірювань, які можуть бути використані, як пристрої вимірювання освітленості.

6.2 Проведення моделювання зміни температури в інсталяційному приміщенні для відпочинку кажанів.

6.3 Розробка загальної структурної схеми інформаційно-вимірювальної системи параметрів мікроклімату в приміщеннях для тварин чутливих до зміни терморегуляції свого тіла.

6.4 Розробка програмного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи параметрів мікроклімату в приміщеннях для тварин чутливих до зміни терморегуляції свого тіла.

6.6 Розробка стартап проєкту.

6.7 Загальні висновки.

7. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Підготувати до захисту презентацію відповідно до теми магістерської дисертації.

8. Орієнтовний перелік публікацій.

Підготувати до захисту: 1 наукову тезу.

9. Консультанти розділів дисертації.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 4.	Вовк О.М., д.е.н., проф.; професор кафедри економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського	01.10.25	11.12.25

10. Дата видачі завдання 2 вересня 2025р.

Календарний план.

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Проведення аналізу існуючих методів та засобів вимірювання параметрів мікроклімату в інсталяціях для кажанів	02.09.25-14.10.25	
2.	Проведення моделювання зміни параметрів мікроклімату для тварин та розробка математичних моделей, які описують ці зміни	15.10.25-01.11.25	
3.	Створення структури ІВС та розробка програмного забезпечення для підтримання мікроклімату в приміщенні для кажанів	02.11.25-05.11.25	
4.	Робота над магістерською дисертацією. Виконання та аналіз результатів для оцінки ефективності розробки.	11.11.25-14.11.25	
5.	Розробка стартап проекту «TerraBat».	01.10.25-11.12.25	
6.	Оформлення чистового варіанту МД.	24.11.25-12.12.25	

7.	Проходження перевірки на співпадіння (основний текст МД у форматі docx).	до 18.12.25	
8.	Передзахист.	16.12.25	
9.	Отримання відгуку та рецензії.	17.12.25	
10.	Подання роботи ЕК.	до 18.12.24	
11.	Захист.	22.12.25- 24.12.25	

Студент

Андрій ГЕРАСИМЧУК

Науковий керівник

Сергій БАРИЛКО

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури. Робота містить обсяг 125 сторінок, 21 ілюстрацію, 37 таблиць.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності утримання тварин, чутливих до змін терморегуляції свого тіла, у штучно створених умовах, що потребує стабільного, керованого мікроклімату, близького до природного середовища існування. Порушення температурно-вологісного режиму та якості повітря призводить до фізіологічного стресу, зниження імунітету та погіршення добробуту тварин, що робить необхідним впровадження сучасних автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем моніторингу та керування мікрокліматом. Розроблення такої системи з обґрунтованою компонентною базою, математичною моделлю температурного поля та оцінкою метрологічних характеристик є актуальним завданням для зоопарків, наукових центрів та спеціалізованих експозицій.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є розроблення, дослідження та метрологічне обґрунтування інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату для тварин, чутливих до змін терморегуляції свого тіла, із забезпеченням просторово-розподіленого моніторингу, підтримання заданих діапазонів температури, вологості, освітленості та вентиляції, а також формуванням умов, що відповідають біологічним вимогам цільового виду тварин.

Для досягнення даної мети, були поставлені основні завдання, які необхідно виконати:

- проаналізувати біологічні вимоги до умов утримання тварин, чутливих до змін терморегуляції, та визначити перелік параметрів мікроклімату, що підлягають контролю;

- обґрунтувати вибір вимірювальних перетворювачів, засобів обробки сигналів та програмно-апаратної платформи для побудови інформаційно-вимірювальної системи мікроклімату;
- розробити алгоритми функціонування та програмне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи, виконати метрологічний аналіз похибок вимірювальних каналів і сформулювати практичні рекомендації щодо її застосування;
- розробити стартап-проект для спроектованої інформаційно-вимірювальної системи.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання та автоматизованого підтримання параметрів мікроклімату в приміщеннях для тварин, чутливих до зміни терморегуляції свого тіла.

Предмет дослідження – розробка комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи параметрів мікроклімату в приміщеннях для тварин чутливих до зміни терморегуляції свого тіла.

Методи дослідження – методи аналітичного та математичного моделювання; теорія вимірювань; методи створення проєктів комп'ютеризованих систем.

Практичне значення отриманих результатів.

У даній магістерській дисертації були отримані результати, які мають практичну цінність:

- розроблено загальну структурну схему інформаційно-вимірювальної системи контролю та автоматизованого підтримання параметрів мікроклімату в приміщеннях для тварин, чутливих до зміни терморегуляції свого тіла;
- розроблено алгоритми функціонування та програмне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи для збору, обробки і керування виконавчими пристроями з підтриманням параметрів мікроклімату у заданих межах;

- побудовано і досліджено математичну та чисельну модель розподілу температури в об'ємі приміщення, що дає змогу обґрунтовано вибирати режими роботи системи та раціональне розміщення датчиків.

Апробація результатів роботи. Отримані в магістерській дисертації результати апробовані на XXI Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні” 10-11 грудня 2025 р. (м. Київ, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”).

Ключові слова: мікроклімат, вологість, освітлення, температура, інформаційно-вимірювальна система.

ABSTRACT

The master's thesis consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, a list of used literature. The work contains a volume of 125 pages, 21 illustrations, 37 tables.

The relevance of this work lies in the need to consists in the need to keep animals sensitive to changes in their body thermoregulation in artificially created conditions requiring a stable, controlled microclimate, close to the natural habitat. Violation of the temperature-humidity regime and air quality leads to physiological stress, reduced immunity and deterioration of animal welfare, which makes it necessary to implement modern automated information-measuring systems for monitoring and controlling the microclimate.

The purpose and objectives of the study. The purpose of this work is to develop, research and metrologically substantiate an information and measuring system for monitoring microclimate parameters for animals sensitive to changes in their body thermoregulation, ensuring spatially distributed monitoring, maintaining specified ranges of temperature, humidity, illumination and ventilation, as well as creating conditions that meet the biological requirements of the target animal species.

In order to achieve this goal, the main tasks that must be performed were set:

- analyze the biological requirements for the conditions of keeping animals sensitive to changes in thermoregulation, and determine the list of microclimate parameters to be controlled;
- justify the choice of measuring transducers, signal processing tools and a software and hardware platform for building an information and measuring system of the microclimate;
- develop algorithms for the functioning and software of the information and measuring system, perform a metrological analysis of the errors of the measuring channels and formulate practical recommendations for its application;
- develop a startup project for the designed information and measuring system.

The object of research is the process of measuring and automatically maintaining microclimate parameters in rooms for animals sensitive to changes in their body's thermoregulation.

The subject of research is development of a computerized information and measurement system for microclimate parameters in rooms for animals sensitive to changes in their body thermoregulation.

Research methods are analytical and mathematical modeling methods; measurement theory; methods for creating designs for computerized systems.

Practical significance of the results obtained.

In this master's thesis, the results that have practical value were obtained:

- a general structural diagram of the information and measuring system for monitoring and automated maintenance of microclimate parameters in rooms for animals sensitive to changes in their body thermoregulation has been developed;
- algorithms for functioning and software for the information and measuring system have been developed for collecting, processing and controlling actuators with maintaining microclimate parameters within specified limits;
- a mathematical and numerical model of temperature distribution in the volume of the room has been built and investigated, which allows for a reasonable choice of system operating modes and rational placement of sensors.

Approbation of the results of the work. The results obtained in the master's thesis were approved at the XXI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists “Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation” on December 10-11, 2025 (Kyiv, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”).

Keywords: microclimate, humidity, lighting, temperature, information and measuring system.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ІНСТАЛЯЦІЯХ ДЛЯ КАЖАНІВ	16
1.1 Постановка завдання для розробки інформаційно-виміральної системи	16
1.2 Опис природного середовища та параметрів мікроклімату для кажана, які необхідно вимірювати та контролювати ІВС.....	16
1.2.1 Географічне поширення виду кажана	16
1.2.2 Середовища існування кажана в природі	17
1.2.3 Висота над рівнем моря та клімат, які необхідні для комфортних умов життя кажана	18
1.3 Поведінка, соціальна динаміка та шаблони активності тварини	18
1.3.1 Нічна активність тварини	18
1.3.2 Соціальна структура існування тварини	19
1.3.3 Пошук їжі та раціон кажанів.....	20
1.3.4 Здатність до ехолокації єгипетських криланів.....	20
1.3.5 Фізіологія та стратегія терморегуляції тварини.....	21
1.3.6 Гомойотермія та відсутність торпору для кажанів.....	21
1.3.7 Механізми терморегуляції кажанів	22
1.4 Стандарти та виклики в утриманні кажанів виду <i>Rousettus aegyptiacus</i>	24
1.4.1 Необхідна температура середовища проживання для тварин.....	24
1.4.2 Необхідна вологість повітря для проживання тварин.....	25

1.4.3 Параметри руху повітря у середовищі проживання тварин	25
1.4.4 Вимоги до освітлення для комфортного проживання тва	26
1.5 Узагальнення вимог до утримання єгипетських криланів в неволі.....	27
1.5.1 Ключові виклики при утриманні в неволі	27
1.5.2 Стрес тварин за некомфортних умов проживання в неволі	27
1.5.3 Соціальні порушення в колоніях кажанів	30
1.5.4 Проблеми зі здоров'ям тварин.....	30
1.6 Огляд існуючих реалізацій систем для інсталляцій кажанів.....	31
Висновки до розділу 1	33
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ДЛЯ ТВАРИН ТА РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, ЯКІ ОПИСУЮТЬ ЦІ ЗМІНИ	34
2.1 Моделювання температурного розподілу в інсталяційному приміщенні .	34
2.1.1 Геометрія та параметри моделі інсталяційних приміщеннях для тварин	34
2.1.2 Конфігурація повітряного входу та розрахунок швидкості подачі повітря у приміщення	35
2.1.3 Результати симуляції зміни температурного поля всередині інсталяційного приміщення	36
2.2 Розробка математичної моделі температурного градієнту.....	37
2.2.1 Вибір математичної моделі зміни температури залежно від висоти.....	37
2.2.2 Перша математична модель зміни температури на різній висоті всередині приміщення відпочинку кажанів	39
2.2.3 Аналіз розрахункових даних для першої математичної моделі.....	40

2.2.4 Друга математична модель зміни температури на різній висоті всередині приміщення відпочинку кажанів	41
2.2.5 Аналіз розрахункових даних для другої математичної моделі	43
Висновки до розділу 2.....	45
РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ СТРУКТУРИ ІВС ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ ДЛЯ КАЖАНІВ	46
3.1 Обґрунтування вибору технічних засобів для створення ІВС	46
3.2 Підсистема ІВС для вимірювання температури повітря в інсталяційному приміщенні для кажанів	48
3.2.1 Порівняльний аналіз та вибір типу датчика температури	48
3.2.2 Вибір конкретної моделі датчика температури та її метрологічні характеристики	50
3.2.3 Схема підключення датчиків температури до ПР102	50
3.3 Підсистема ІВС для вимірювання відносної вологості.....	51
3.3.1 Порівняльний аналіз та вибір типу датчика вологості.....	51
3.3.2 Порівняння датчиків вологості та вибір оптимального варіанту	52
3.4 Вимірювання освітленості в інсталяційному приміщенні.....	54
3.4.1 Типи датчиків освітленості	55
3.4.2 Огляд датчиків освітленості та вибір оптимального рішення.....	57
3.4.4 Рекомендований вибір датчика освітленості для інтеграції в ІВС	57
3.5 Розробка структурної схеми ІВС.....	58
3.6 Розробка програмного забезпечення ІВС та принцип її роботи	59
3.7 Обчислення невизначеності вимірювального каналу температури	66

3.8 Обчислення невизначеності вимірювального каналу вологості	69
3.9 Обчислення невизначеності вимірювального каналу освітленості	71
Висновки до розділу 3.....	72
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «TERRAVAT»	74
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту.....	74
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	79
4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту.....	92
4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності	101
Висновки до розділу 4.....	109
ВИСНОВКИ	111
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	113
ДОДАТКИ.....	120

ВСТУП

Утримання тварин у штучно створених умовах, чи то в зоологічних парках, науково-дослідних центрах, чи на сучасних фермерських господарствах, є складним комплексним завданням, що вимагає глибокого розуміння біологічних та фізіологічних потреб кожного виду. Особливої уваги потребують тварини, що є фізіологічно чутливими до змін у навколишньому середовищі, зокрема ті, для яких процес терморегуляції є енергетично затратним і критично важливим для виживання та здоров'я. Для таких видів будь-яке відхилення параметрів мікроклімату від оптимальних значень може призвести до фізіологічного стресу, зниження імунітету, порушення природної поведінки та, у довгостроковій перспективі, до розвитку хронічних захворювань.

Забезпечення стабільного та контрольованого середовища є ключовим фактором для підтримки високого рівня добробуту тварин. Сучасний підхід до вирішення цього завдання полягає у розробці та впровадженні автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). Основна мета таких систем – не просто підтримувати статичні, задані параметри, а відтворювати динамічне, стабільне та комфортне середовище, що максимально наближене до природного ареалу існування тварин. Це включає точний моніторинг та керування цілим комплексом параметрів мікроклімату, таких як температура повітря, відносна вологість, якість повітря (концентрація CO₂ та аміаку), рівень освітленості та швидкість руху повітряних потоків.

Метою даного звіту є дослідження основних принципів побудови інформаційно-вимірювальної системи для контролю параметрів мікроклімату. У рамках роботи було проведено аналіз вимог до системи, обґрунтовано вибір первинних вимірювальних перетворювачів та розроблено структурну схему ІВС. Результати цієї роботи є теоретичною та практичною основою для створення сучасних, автоматизованих та енергоефективних рішень, спрямованих на значне покращення умов утримання та добробуту тварин.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ІНСТАЛЯЦІЯХ ДЛЯ КАЖАНІВ

1.1 Постановка завдання для розробки інформаційно-вимірювальної системи

Проектування будь-якої інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для контролю мікроклімату зоологічного середовища має ґрунтуватися на глибокому розумінні біології та природної історії цільового виду. Основна мета такої системи - не просто підтримувати довільні задані параметри навколишнього середовища, а з високою точністю відтворити конкретну екологічну нішу, до якої адаптована тварина. Це забезпечує заохочення типової для виду поведінки, мінімізує фізіологічний стрес і, зрештою, гарантує високий стандарт добробуту тварин.

Для Нільського крилана (*Rousettus aegyptiacus*) – виду з величезним географічним ареалом і складною соціальною структурою – це фундаментальне знання є особливо важливим. Цей розділ містить детальний опис природного середовища існування виду, поведінкової екології та унікальної терморегуляторної фізіології, що закладає біологічне обґрунтування, яким повинні керуватися технічні вимоги до запропонованої ІВС для інсталяційних приміщень.

1.2 Опис природного середовища та параметрів мікроклімату для кажана, які необхідно вимірювати та контролювати ІВС

1.2.1 Географічне поширення виду кажана

Нільський крилан демонструє надзвичайно широкий та розірваний географічний ареал [2], що охоплює континентальну Африку, Близький Схід, Середземномор'я та північні регіони Індійського субконтиненту.

Його ареал простягається по Африці на південь від Сахари фрагментовано, зі значними популяціями в Північній Африці, на Аравійському півострові та так

далеко на схід, як Іран і Пакистан [4]. У Середземномор'ї його знаходять на острові Кіпр і вздовж узбережжя Туреччини, де він є єдиним видом плодоїдних кажанів у Європі [2].

Такий великий ареал означає, що вид присутній майже в усіх біотичних зонах- від тропічних дощових лісів і листяних лісів до саван і навіть посушливих біомів за помітним винятком середземноморських прибережних зон та зон Сахельської савани [4].

Ця здатність до адаптації до широкого спектру макрокліматів є свідченням екологічної стійкості виду. Однак це також означає, що локалізовані популяції специфічно адаптовані до переважаючих регіональних умов, що підкреслює: успішне середовище у неволі повинно бути адаптоване до конкретної та придатної точки в межах цього природного спектру, а не до узагальненого середнього показника.

1.2.2 Середовища існування кажана в природі

Незважаючи на його присутність у різноманітних кліматичних зонах, поширення *Rousettus aegyptiacus* насамперед обмежується двома критично важливими ресурсами: цілорічною доступністю плодоносних дерев і, найголовніше, присутністю придатних денних сховищ [4].

Цей вид демонструє сильну перевагу до ночівлі у великих, темних та термічно стабільних середовищах, причому природні печерні системи є архетипічним середовищем існування [2]. За відсутності природних печер, вони охоче займають різноманітні печероподібні структури, включаючи стародавні руїни, гробниці, покинуті будівлі, ангари та шахти [2].

Ці сховища постійно характеризуються темрявою та стабільною, злегка вологою атмосферою [5]. Вибір такого середовища є ключовою поведінковою адаптацією. Печери мають високу теплову інерцію, що означає, що їхня внутрішня температура та вологість залишаються відносно постійними, буферизуючи їх від часто екстремальних коливань зовнішнього середовища. Ця

природна мікрокліматична стабільність мінімізує енергетичні витрати на терморегуляцію для кажанів.

Цей принцип має першочергове значення для проектування штучного середовища існування. Основною метою ІВС має бути не жорстке встановлення єдиної, однакової температури по всій інсталяції, а імітація буферизованих, стабільних умов природного печерного сховища, в межах якого тварини можуть додатково удосконалювати своє термальне середовище за допомогою поведінкових засобів.

1.2.3 Висота над рівнем моря та клімат, які необхідні для комфортних умов життя кажана

Нільський крилан поширений у широкому висотному градієнті [4], від рівня моря до приблизно 4000 метрів над рівнем моря. Така толерантність до різноманітної висоти та пов'язаного з нею барометричного тиску додатково підкреслює його адаптивність. Однак його присутність на будь-якій висоті нерозривно пов'язана зі здатністю місцевого клімату підтримувати плодоносні рослини, що складають його раціон [4]. Поширення цього виду як у середземноморській зоні південної Туреччини, так і в субтропічних пустелях Єгипту та Аравійського півострова [3] демонструє його здатність процвітати в середовищах зі значними відмінностями в температурних режимах та схемах опадів. Це підтверджує необхідність точного та надійного контролю як температури, так і вологості у вольєрі в неволі, щоб точно імітувати умови певного, життєзабезпечуючого середовища існування в межах його природного ареалу.

1.3 Поведінка, соціальна динаміка та шаблони активності тварини

1.3.1 Нічна активність тварини

Rousettus aegyptiacus – це винятково нічний вид [5]. Упродовж дня колонія перебуває у темряві свого сховища. Активність починається надвечір: тварини доглядають за собою (займаються грумінгом) та спілкуються, а в сутінках

вилітають на пошуки їжі [7]. Зазвичай вони повертаються до сховища перед світанком [7]. Цей режим активності тісно синхронізований із природним фотоперіодом, тобто чергуванням світла та темряви [7]. Дослідження засвідчили, що довший світловий день у літні місяці затримує вечірній виліт зі сховища. Це вказує на чітко визначений циркадний ритм, який підлаштовується під рівень навколишнього освітлення [7]. Така поведінка диктує головну та беззаперечну вимогу до ІВС в умовах зоопарку. Зазвичай для таких тварин створюють нічну експозицію зі зворотним (реверсивним) світловим циклом, що дозволяє відвідувачам спостерігати за ними, а доглядачам – обслуговувати вольєр під час активності тварин [12]. Система має забезпечувати сталий програмований фотоперіод, наприклад, 12 годин світла та 12 годин темряви [12]. Вкрай важливо, щоб переходи між цими станами не були різкими [12]. Раптова зміна світла на темряву (або навпаки) може викликати реакцію переляку та спричинити значний фізіологічний стрес [12]. Тому модуль керування освітленням ІВС повинен мати функцію плавного регулювання яскравості (димування) для створення поступових, імітованих періодів світанку та сутінків. Це відтворюватиме природні переходи, до яких адаптований цей вид [12].

1.3.2 Соціальна структура існування тварини

Нільський крилан – це високосоціальний та зграйний вид, що живе колоніями, розмір яких може варіюватися від невеликих груп у 20–40 особин до масивних скупчень, що налічують до 50 000 [2]. У сховищі вони демонструють характерну поведінку, утворюючи щільні скупчення та тісно тулячись одне до одного [5]. Така поведінка слугує двом взаємопов'язаним цілям: зміцненню соціальних зв'язків та спільній терморегуляції. Соціальна структура цих колоній складна і не обмежується простим скупченням. Дослідження показують, що особини здатні розрізняти знайомих і незнайомих представників свого виду, формувати стабільні соціальні групи в межах великої колонії та підтримувати вибіркові «дружні» зв'язки [17]. Ці зв'язки зміцнюються через таку поведінку, як

розділення їжі, коли деякі особини, особливо самки, випрошують фрукти в обраних самців-партнерів [20]. Стабільність цієї складної соціальної мережі є ключовим показником добробуту колонії. Стресові фактори навколишнього середовища, такі як неналежна температура, погана якість повітря або раптові зміни освітлення, можуть порушити цю соціальну динаміку, призводячи до зростання агресії та погіршення загального стану [21]. Таким чином, ІВС відіграє непряму, але життєво важливу роль у підтримці соціального здоров'я колонії, забезпечуючи стабільне, прогнозоване та комфортне фізичне середовище.

1.3.3 Пошук їжі та раціон кажанів

Нільський крилан є переважно плодоїдним (фруктоїдним). Він споживає різноманітні м'які, соковиті фрукти, такі як інжир, фініки, мушмула та шовковиця [2]. Раціон доповнюється листям, нектаром і пилом, що робить цих тварин важливими запилювачами та розповсюджувачами насіння у їхніх природних екосистемах [5]. Вони здатні долати значні відстані (до 40 км за ніч), щоб знайти джерела стиглих плодів [2]. У неволі цей раціон зазвичай відтворюють за допомогою суміші доступних фруктів, як-от банани, яблука, дині та виноград, іноді додаючи овочі [25]. Метаболічні та фізіологічні наслідки такого раціону, а також висока щільність тварин, безпосередньо впливають на мікроклімат інсталяції. Високий вміст води у фруктовій дієті в поєднанні з метаболічною водою, що її виробляють самі тварини, значно підвищує вологість повітря у вольєрі. Крім того, спільне дихання та продукти життєдіяльності великої колонії активно змінюють склад атмосфери. Тому ефективна ІВС має бути спроектована не як статичний контролер інертного середовища, а як динамічна система, здатна реагувати на постійне надходження вологи та метаболічних газів біологічного походження.

1.3.4 Здатність до ехолокації єгипетських криланів

Рід *Rousettus* – єдиний серед родини Pteropodidae (криланів Старого Світу, або «мегакажанів»), хто володіє здатністю до ехолокації, тоді як інші

представники родини переважно покладаються на зір та нюх [2]. Вони видають серію коротких, імпульсивних, парних клацань язиком у частотному діапазоні 12–70 кГц, які використовують для навігації в абсолютній темряві своїх печерних схованок [7]. Ця форма ехолокації вважається примітивнішою, ніж складна гортанна ехолокація підряду *Microchiroptera* («мікрокажанів»), проте вона є життєво необхідною для уникнення перешкод у переповнених середовищах їхнього перебування [7]. Для пошуку їжі поза сховищем вони покладаються на добре розвинені зір та нюх [9]. Наявність цієї унікальної вокальної поведінки відкриває потенційну можливість для нової модальності моніторингу в межах ІВС. Акустичні датчики можна було б використати для неінвазивного відстеження рівня активності, використання простору вольєра та, ймовірно, навіть соціальних взаємодій.

1.3.5 Фізіологія та стратегія терморегуляції тварини

Стратегія терморегуляції єгипетського летючого собаки (*Rousettus aegyptiacus*) є визначальним аспектом його біології та висуває найкритичніший набір вимог до проєктування ІВС. Оскільки це ссавець середнього розміру (80–170 г) із великою, неізовованою поверхнею крил, його взаємодія з тепловим середовищем є постійним енергетичним викликом [2].

1.3.6 Гомойотермія та відсутність торпору для кажанів

Ключова фізіологічна особливість нільського крилана полягає в тому, що він є справжнім ендотермним гомойотермом [22]. Він активно підтримує стабільну та високу внутрішню температуру тіла T , яка циклічно змінюється протягом доби: від приблизно 35.5°C під час фази відпочинку до 37.7°C після повернення з пошуків їжі [27]. На відміну від багатьох дрібніших видів кажанів помірної зони, які для збереження енергії використовують торпор — стан значно зниженого метаболізму та температури тіла, — *R. aegyptiacus* такої стратегії не застосовує [27]. Дослідження диких популяцій у Південній Африці, де особини перебували в прохолодних печерах (із температурою навколишнього

середовища, T_c , в діапазоні від 7°C до 12°C), показали, що жодна тварина не дозволила внутрішній температурі свого тіла впасти нижче 34°C [27]. Навіть в умовах неволі, під час позбавлення їжі, особини підтримували нормотермічну температуру тіла [27].

Біологічне значення цієї нездатності впадати в торпор є величезним: кажани змушені постійно витрачати значну кількість метаболічної енергії на виробництво тепла та захист своєї високої внутрішньої температури тіла від тепловтрат у навколишнє середовище. Це робить їх надзвичайно чутливими до температурних умов у їхньому сховищі. Неоптимальне теплове середовище накладає серйозні енергетичні "штрафи", змушуючи тварин відволікати ресурси від інших життєво важливих функцій, таких як імунна відповідь, ріст та розмноження. Відповідно, головною функцією ІВС має бути забезпечення термічно стабільного та енергетично нестресового середовища, щоб мінімізувати ці метаболічні витрати.

1.3.7 Механізми терморегуляції кажанів

Для керування своїм енергетичним бюджетом нільські крилани застосовують комплекс складних поведінкових та фізіологічних механізмів терморегуляції.

Найважливішою поведінковою адаптацією для терморегуляції є соціальне скупчення. Збиваючись у щільні групи у сховищі, особини колективно зменшують відкриту (незахищену) площу поверхні відносно об'єму тіла та діляться метаболічним теплом. Це створює всередині скупчення локальний мікроклімат, який може бути значно теплішим за навколишнє повітря [5]. Така кооперативна терморегуляція є надзвичайно ефективною стратегією енергозбереження. Ця поведінка докорінно ставить під сумнів саму концепцію єдиної, "оптимальної температури" в приміщенні для утримання. Система керування, що намагається підтримувати гомогенну температуру в усьому вольєрі, не здатна забезпечити умови для цієї надзвичайно важливої природної

поведінки. Натомість, система має бути розроблена так, щоб забезпечувати стабільну фонову (базову) температуру, яка дозволить кажанам самостійно створювати тепліші, динамічні мікрозони шляхом скупчення. Це вимагає створення та підтримки температурних градієнтів усередині вольєра, що дозволить тваринам обирати бажане теплове середовище, переміщуючись між теплішими спільними зонами для сідала та прохолоднішими зонами для пошуку їжі чи відпочинку наодинці.

У спекотних умовах, коли виникає необхідність позбутися зайвого тепла, *R. aegyptiacus* застосовує декілька механізмів випаровувального охолодження. До них належать: дихання з відкритим ротом (задишка), облизування тіла та обмахування великими, багатими на кровоносні судини, крильними перетинками [30]. Крила, завдяки своїй великій площі та рясному кровопостачанню, слугують надзвичайно ефективними "радіаторами" для теплообміну [30]. Для ефективності цих фізіологічних механізмів необхідний належний рух повітря, який би відносив тепло та випаровану вологу від поверхні тіла. Це означає, що ІВС має керувати не лише температурою повітря, але й вентиляцією та циркуляцією, щоб сприяти цьому природному процесу охолодження, запобігаючи тепловому стресу в періоди високої активності або за підвищеної температури навколишнього середовища.

Дослідження виявили дивовижну та складну особливість їхньої фізіології: здатність до значної регіональної гетеротермії, особливо у крилах [32]. Тоді як внутрішня температура тіла залишається високою та стабільною, температура дистальних (віддалених) структур крила може бути суттєво нижчою. Безперервні вимірювання під час польотів в аеродинамічній трубі показали, що м'язи передпліччя можуть функціонувати при температурах, аж на 12°C нижчих за ректальну температуру тіла [32]. Цей різкий проксимально-дистальний температурний градієнт (від основи до кінчиків крил) є адаптивним механізмом для мінімізації конвективних та радіаційних тепловтрат із великих,

неізолюваних поверхонь крил під час відпочинку та польоту. Ця фізіологічна деталь відкриває потенційний шлях для прогресивного, неінвазивного моніторингу добробуту тварин. Температура поверхні крил, яку можна вимірювати дистанційно за допомогою технології тепловізійного сканування, може слугувати чутливим та динамічним індикатором терморегуляційного стану, метаболічної активності та загального рівня фізіологічного стресу кажана.

1.4 Стандарти та виклики в утриманні кажанів виду *Rousettus aegyptiacus*

Щоб поєднати природну біологію виду з практичними аспектами догляду, необхідно синтезувати визнані стандарти утримання. Ці стандарти, які часто розробляються професійними організаціями, як-от Асоціація зоопарків та акваріумів (AZA), надають кількісні цільові показники для параметрів навколишнього середовища. При розробці IBC ці параметри слугують основними технічними специфікаціями. У цьому розділі викладено встановлені стандарти утримання криланів Старого Світу в неволі, що стосуються температури, вологості, вентиляції та освітлення. Також детально описано суттєві аспекти проєктування вольєрів та висвітлено ключові проблеми добробуту тварин, які високоточна, автоматизована система контролю середовища (IBC) здатна унікально вирішувати та пом'якшувати.

1.4.1 Необхідна температура середовища проживання для тварин

Як тропічний вид, який не впадає в сплячку і не використовує торпор, підтримка відповідного температурного середовища має першочергове значення [12]. Рекомендації щодо утримання тропічних видів кажанів передбачають діапазон температури повітря від 21 до 30 °C, при цьому ідеальною часто вказується температура 27 °C [12]. Вкрай важливо забезпечити температурний градієнт всередині вольєру, а не рівномірну температуру [12]. Це дозволяє кажанам здійснювати поведінкову терморегуляцію, обираючи тепліші або прохолодніші ділянки залежно від змін їхніх фізіологічних потреб. Додаткові

джерела тепла, такі як захищені керамічні обігрівачі або нагрівальні панелі, необхідні, якщо температура всередині вольєру може опуститися нижче 21 °C [12]. Натомість під час періодів високих зовнішніх температур або підвищеної активності всередині слід передбачити запобіжні заходи проти перегріву. Зволожувачі, вентилятори та належна вентиляція допомагають зменшити тепловий стрес, який поведінково проявляється через важке дихання та надмірне махання крилами, коли температура підходить до або перевищує 32 °C [12]. Усі нагрівальні елементи повинні бути належним чином захищені, щоб запобігти прямому контакту кажанів і опікам [15].

1.4.2 Необхідна вологість повітря для проживання тварин

Відносна вологість всередині вольєру повинна відтворювати вологі умови природного печерного укриття. Для тропічних видів рекомендований діапазон становить від 60 % до 90 % RH [12]. Деякі джерела пропонують трохи вузький діапазон 55–65 %, щоб стримати ріст потенційних грибкових або бактеріальних патогенів, водночас забезпечуючи достатню вологість [15]. Постійно низька вологість є серйозною проблемою для добробуту, оскільки може призвести до зневоднення та зробити тонкі крилові мембрани кажанів сухими, потрісканими та вразливими до пошкоджень [12]. Для підтримки відповідного рівня вологості, особливо в закритих вольєрах, де системи опалення та кондиціонування повітря можуть створювати дуже сухе повітря, IMS має контролювати автоматизовані зволожувачі або системи туманоутворення, підключені до гігростата [12].

1.4.3 Параметри руху повітря у середовищі проживання тварин

Адекватна вентиляція є необхідною для підтримки належної якості повітря, що особливо важливо для великої колонії ссавців з високою щільністю населення в замкненому просторі. Правильний обмін повітря виконує кілька функцій: усуває неприємні запахи, запобігає накопиченню шкідливих метаболічних газів, таких як аміак і вуглекислий газ, а також допомагає регулювати температуру та вологість [12]. Група радників з таксонів кажанів AZA (TAG) надає конкретні

інженерні рекомендації, радячи проводити 6–10 повних обмінів повітря на годину, при цьому мінімум 25 % цього обсягу має становити свіже, не рециркульоване повітря [12]. З метою біобезпеки та охорони здоров'я повітря, що видаляється з експозиції кажанів, має виводитися безпосередньо на вулицю і не рециркулювати в інші частини будівлі [12]. Цей кількісний параметр повинен бути основним компонентом ІВС, який не лише контролює систему вентиляції (наприклад, вентилятори зі змінною швидкістю), а й, бажано, перевіряє швидкість потоку повітря для забезпечення відповідності цьому стандарту.

1.4.4 Вимоги до освітлення для комфортного проживання тва

Як нічний вид, що мешкає в печерах, режим освітлення для *R. aegyptiacus* повинен ретельно контролюватися, щоб відповідати його природному циркадному ритму, одночасно забезпечуючи можливість спостереження та догляду. Це зазвичай досягається за допомогою зворотного світлового циклу [12].

- **Фотоперіод:** Рекомендовано стандартний 12-годинний «день» (темний період для кажанів) і 12-годинну «ніч» (світлий період для кажанів), щоб забезпечити послідовний та передбачуваний цикл [12].
- **Спектр та інтенсивність світла:** Під час періоду спокою кажанів можна використовувати світло повного спектру або люмінесцентне для освітлення вольєру для доглядачів та відвідувачів [12]. Під час активного періоду кажанів потрібне тьмяне освітлення, яке імітує місячне світло та дозволяє спостереження без порушення природної поведінки. Хоча використовували червоне світло, яке погано сприймається багатьма нічними ссавцями, у сучасних експозиціях часто віддають перевагу синьому світлу [13]. Синє світло краще імітує колір та інтенсивність природного місячного світла, не спотворює забарвлення тварин для огляду відвідувачами і, як показано, мінімально впливає на циркадну фізіологію [12].

- **Контроль освітлення:** Найважливішим аспектом системи освітлення є перехід між світлом і темрявою. ІВС має контролювати світло через програмований таймер із системою затемнення [12]. Це дозволяє повільно й поступово змінювати інтенсивність світла, імітуючи природний світанок і захід сонця, запобігаючи фізіологічному шоку та стресу, пов'язаному з різкими змінами освітлення. Крім того, вольєр має включати повністю затемнені ділянки, такі як штучні печерні конструкції або гніздові коробки, де кажани можуть повністю уникати світла під час відпочинку, як у природній печері [12].

1.5 Узагальнення вимог до утримання єгипетських криланів в неволі

Таблиця 1.1 узагальнює ці параметри утримання в консолідований набір технічних характеристик, який може безпосередньо використовуватися для проєктування, програмування та калібрування ІВС

1.5.1 Ключові виклики при утриманні в неволі

Попри дотримання найкращих практик утримання, тварини в неволі стикаються з природними труднощами. Сучасна система ІВС є потужним інструментом для зменшення цих ризиків, забезпечуючи, щоб саме середовище не ставало джерелом стресу чи хвороб.

1.5.2 Стрес тварин за некомфортних умов проживання в неволі

Основними психологічними проблемами для тварин у неволі є страх і нудьга [21]. Хронічний стрес може виникати через численні фактори середовища, зокрема субоптимальні температури, неправильну вологість, раптові зміни освітлення, відсутність відповідних укриттів та місць для відпочинку, а також непослідовні рутини доглядачів. Гострий стрес і фізичні травми можуть виникати через неправильне поводження або небезпечну конструкцію вольєру, наприклад використання абразивних матеріалів, що ушкоджують крила [14].

Таблиця 1.1 - Оптимальні параметри середовища для утримання *Rousettus aegyptiacus* у неволі

Параметр	Рекомендований діапазон	Ідеальні умови	Біологічні Обґрунтування/Пояснення	Можливі виконавчі пристрої
Температура навколишнього середовища	21 – 30°C	27°C	Підтримує гомеотермію для тропічного виду, який не впадає в торпор, зменшуючи енергетичне навантаження.	Захищені керамічні обігрівачі, нагрівальні панелі, просторові обігрівачі, вентилятори для охолодження.
Тепловий градієнт	Обов'язково	Градiєнт у кілька градусів Цельсія між зонами відпочинку та зони для активності.	Дозволяє здійснювати поведінкову терморегуляцію (наприклад, шукати тепло для відпочинку або прохолодніші ділянки для активності).	Зоновані елементи обігріву/охолодження, контрольована вентиляція.
Відносна вологість	60 – 90%	70%	Запобігає зневодненню та висиханню тонких крилових мембран, імітуючи вологі умови печер.	Автоматизовані системи зволоження, генератори туману, зволожувачі повітря.
Вентиляція	6–10 обмінів повітря на годину	8 обмінів/год із $\geq 25\%$ свіжого повітря.	Запобігає накопиченню шкідливих метаболічних газів (NH_3 , CO_2) та патогенів; сприяє контролю температури та вологості.	Вентилятори витяжки з регульованою швидкістю, заслінки для подачі свіжого повітря.
Цикл освітлення	Обернений фотоперіод	12 годин світла / 12 годин темряви.	Відповідає природному циркадному ритму та одночасно дозволяє спостерігати за активністю кажанів.	Програмований астрономічний таймер
«Денне» освітлення (ніч	Повний спектр	-	Імітує денне світло для доглядачів і відвідувачів під час періоду спокою	Люмінесцентні або світлодіодні лампи

для кажанів)			кажанів.	повного спектра
«Нічне» освітлення (день для кажанів	Тьмяне освітлення, імітація місячного світла	Низький рівень освітленості, перевага надається синьому спектру.	Дозволяє спостерігати природну нічну поведінку без порушення спокою або циркадного ритму.	Світлодіодні лампи з регульованою яскравістю та синім або червоним фільтром
Перехід світла	Поступовий	Період поступового затемнення/освітлен ня тривалістю 15–30 хвилин	Імітує природний світанок і захід сонця, запобігаючи стресу та різким реакціям на раптові зміни освітлення.	Диммер

1.5.3 Соціальні порушення в колоніях кажанів

Для надзвичайно соціального й колоніального виду, такого як *R. aegyptiacus*, соціальна стабільність є синонімом добробуту. Дефіцит спілкування у колоніальних кажанів задокументовано як причина серйозних патологічних станів, включаючи анорексію, випадіння шерсті, розлади травлення та навіть смерть [21]. Хоча ІВС не може безпосередньо керувати соціальними взаємодіями, вона забезпечує стабільну основу середовища, на якій може формуватися здорова соціальна структура. Мінімізуючи фактори навколишнього середовища, що могли б спричинити підвищену агресію, захист ресурсів або конфлікти, система допомагає підтримувати спокійне й стабільне соціальне середовище.

1.5.4 Проблемі зі здоров'ям тварин

Багато з найсерйозніших загроз здоров'ю кажанів у неволі безпосередньо пов'язані з помилками у керуванні середовищем. Погана вентиляція та накопичення аміаку з сечі та фекалій можуть призвести до тяжких респіраторних захворювань і подразнення слизових оболонок [36]. Некоректні рівні температури та вологості здатні пригнічувати імунну функцію, роблячи тварин більш сприйнятливими до опортуністичних інфекцій. Катастрофічна невдача програми розведення в неволі для рідкісного Virginia big-eared bat, коли більшість популяції загинула через такі проблеми, як перегрів інкубаторів і неправильне облаштування кліток, є яскравим нагадуванням про життєво важливе значення контролю середовища [35]. Цей випадок підкреслює, що надійна, точна та стабільна ІВС – це не просто зручність або покращення умов у зоопарку; це необхідна система життєзабезпечення.

Крім того, проста система контролю на основі статичних заданих параметрів не враховує динамічний характер біологічної системи, яку вона має

підтримувати. Велика колонія кажанів не є пасивним мешканцем приміщення; вона активно змінює своє середовище. Колективне метаболічне тепло від щільно зібраної групи кажанів може створювати значне локальне джерело тепла. Безперервне дихання та виділення продуктів життєдіяльності колонії додають у атмосферу вольєру тепло, водяну пару, вуглекислий газ і аміак. Швидкість цих внесків варіює залежно від рівня активності колонії, яка сама по собі пов'язана з циркадним світловим циклом. Система контролю, що працює за простим таймером або одним датчиком температури, не може адекватно реагувати на цей біологічний зворотний зв'язок. Вона може надмірно охолоджувати вольєр у відповідь на теплу групу кажанів, роблячи інші ділянки надто холодними для поодиноких особин, або недостатньо вентилювати повітря у години пікової активності, що дозволяє якості повітря погіршуватися до небезпечного рівня. Отже, справді передова та науково новаторська ІВС повинна бути спроектована для моніторингу не лише стану фізичного середовища, а й біологічних показників колонії, використовуючи ці дані для динамічного регулювання стратегії контролю в реальному часі.

1.6 Огляд існуючих реалізацій систем для інсталляцій кажанів

У таблиці 1.2 подано короткий огляд поширених комерційних рішень, що застосовуються для моніторингу та/або регулювання параметрів середовища у приміщеннях для утримання кажанів і суміжних системах. Метою огляду є узагальнення їх функціональних можливостей і типових обмежень.

Таблиця 1.2 – Огляд переваг та недоліків існуючих рішень

Система	Переваги	Недоліки
Inkbird ITC-306T	Доступний за ціною; просте налаштування; придатний для базової задачі підтримання температури; поширений і легко замінюваний.	Орієнтований фактично на один параметр; обмежені алгоритми керування (здебільшого “вкл/викл”); слабкі можливості журналювання й аналітики; не

		розрахований на складні сценарії або масштабування.
Exo Terra Thermostat & Hygrostat	Поєднання контролю температури та вологості; підтримка добових режимів; зручний для користувача інтерфейс; наявність захисних/сигнальних функцій у типових режимах експлуатації.	Функціональність визначається виробником і слабо розширюється; орієнтація на автономне застосування; обмежені можливості системної архівації даних і детальної аналітики; залежність від конкретного виконання пристрою та його датчиків.
Zoo Med Environmental Control Center (RT-1000)	Багатоканальність (кілька зон температури, вологості); наявність таймерів, тривоги і пам'яті налаштувань; підвищена функціональність у порівнянні з простими термостатами.	Рішення “усе-в-одному”, що складно адаптувати під нетипові сценарії; обмежена відкритість щодо внутрішньої логіки та параметрів вимірювань; не є інструментом для глибокого аналізу даних та довготривалої експлуатаційної статистики.
Herpstat 4 SpyderWeb	Розвинуті сценарії керування; віддалений доступ і моніторинг; наявність графіків/сповіщень; можливість керувати кількома зонами.	Вища вартість; прив'язка до екосистеми виробника; складніший для первинного налаштування; інформація про метеорологічні характеристики та точність вимірювань у користувацьких матеріалах часто подається обмежено.
Neptune Systems Apex (A3) + Apex Fusion	Потужна платформа з розвинутим віддаленим доступом; сценарії автоматизації, сповіщення, логування; модульний підхід і можливість нарощування функцій залежно від конфігурації.	Висока вартість володіння (база + модулі); орієнтація переважно на акваріумні сценарії; залежність від модулів/сумісності та хмарних сервісів; складність системи підвищує вимоги до кваліфікації користувача.
SensorPush (T/RH логери)	Зручний моніторинг температури/вологості; накопичення історії, візуалізація; можливість експорту даних (залежно від конфігурації/сервісів); простота встановлення.	Це моніторинг без керування; обмежена номенклатура параметрів; залежність від бездротового зв'язку/екосистеми; непридатний як самостійне рішення для підтримання режимів без додаткових пристроїв.

Висновки до розділу 1

У розділі показано, що для видів тварин, чутливих до змін терморегуляції, «мікроклімат» не зводиться до одного показника, а є сукупністю взаємопов'язаних умов, які мають підтримуватися стабільно та керовано. Це підтверджується тим, що для тварин виду *Rousettus aegyptiacus* важливі не лише допустимі діапазони температури й вологості, а також наявність теплового градієнта для поведінкової терморегуляції, нормативний повітрообмін (6–10 обмінів/год) для запобігання накопиченню NH_3 і CO_2 , а також керований фотоперіод і плавні переходи освітлення.

Одночасно обґрунтовано, що відхилення цих умов є фактором хронічного стресу, який може формуватися саме через субоптимальні параметри середовища. Огляд типових комерційних рішень показав характерну проблему: більшість доступних пристроїв або працює лише з 1–2 параметрами або забезпечує моніторинг без керування, має обмежене налаштування, аналітику та слабку придатність до масштабування.

З цього випливає потреба у ІВС, яка вимірює комплекс параметрів, забезпечує архівацію даних і автоматизоване керування виконавчими пристроями за формалізованими вимогами утримання.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ДЛЯ ТВАРИН ТА РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, ЯКІ ОПИСУЮТЬ ЦІ ЗМІНИ

2.1 Моделювання температурного розподілу в інсталяційному приміщенні

Оскільки чисельне моделювання температурних полів у тривимірному просторі із врахуванням теплопередачі, граничних умов та геометричних особливостей є нетривіальною задачею з погляду як аналітичного опису, так і експериментальної валідації, було вирішено реалізувати комп'ютерну симуляцію в середовищі ANSYS Fluent. Цей підхід дозволяє враховувати складну взаємодію між нагрівальними елементами та повітряним об'ємом. Основною метою симуляції було отримання детального температурного розподілу, з подальшим його узагальненням у вигляді спрощеної одновимірної моделі температурного градієнта по висоті, яка буде розглянута у наступному розділі.

2.1.1 Геометрія та параметри моделі інсталяційних приміщеннях для тварин

Для моделювання використовувалась замкнена прямокутна область, що відповідає внутрішньому простору інсталяції, розмірами 8x8x4 м.

У нижній частині об'єму розташовувався нагрівач у вигляді суцільного блоку розміром 1x3 м, який симулював джерело тепла з фіксованою температурою 350 К. Поверхня нагрівача встановлена на позначці $z = 0,5$ м, тобто майже на дні приміщення.

У моделі було враховано два отвори – припливний і витяжний, розташовані у верхній частині приміщення. Вони розташовані на протилежних стінках інсталяційного приміщення, припливний отвір знаходиться на відстані 105мм від підлоги приміщення, витяжний отвір знаходиться на відстані 428мм

від його стелі. Габарити обох отворів є однаковими та становлять 1х1 м.

Побудована модель зображена на рисунку 2.2.

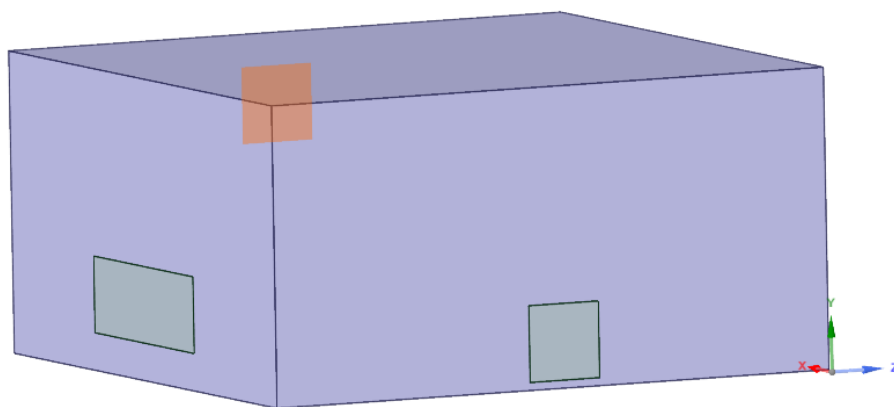


Рисунок 2.1 – Тривимірна модель інсталяційного приміщення у середовищі ANSYS SpaceClaim.

2.1.2 Конфігурація повітряного входу та розрахунок швидкості подачі повітря у приміщення

Швидкість повітря на припливному отворі визначалась на основі вимоги забезпечення 8 обмінів повітря на годину (8 ACH) для приміщення об'ємом 256 м³. Це дозволяє ефективно виводити надлишки CO₂ та вологи без порушення стабільності температурних полів.

Об'єм повітря, який має заміщуватись щогодини:

$$V_{ACH} = 256 \text{ м}^3 \cdot 8 = 2048 \text{ м}^3/\text{год}$$

Переведемо в секунди:

$$\dot{V} = \frac{2048}{3600} \approx 0.569 \text{ м}^3/\text{сек}$$

Для отвору площею 1 м² відповідна вхідна швидкість становить 0.569 м/с.

Отримані значення швидкостей були закладені у граничні умови на припливному отворі як velocity inlet із температурою повітря 293.15 К (20 °С). Розрахунки враховували, що повітря подається ззовні, а середовище всередині

приміщення нагрівається локально нагрівачем.

2.1.3 Результати симуляції зміни температурного поля всередині інсталяційного приміщення

CFD-аналіз підтвердив утворення передбачуваного вертикального температурного градієнта, з мінімальними відхиленнями по горизонталі (до 2°C). У зоні дії припливного струменя спостерігались локальні підвищення швидкості, тоді як у середній частині приміщення швидкість стабілізувалась у межах $0.02\text{--}0.08\text{ м/с}$, що відповідає вимогам для виду *Rousettus aegyptiacus*.

На рис. 2.2 та рис. 2.3 зображено мапа температури та швидкості повітряного потоку на висоті 1 м:

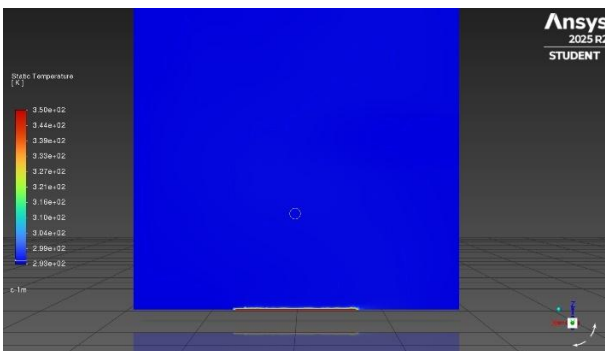


Рисунок 2.2 – Контурна карта температури на висоті 1 м

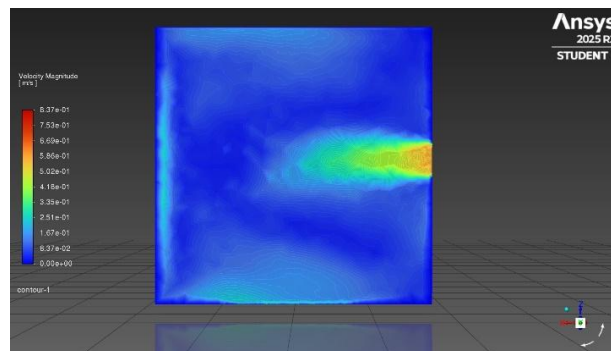


Рисунок 2.3 – Контурна карта швидкості повітря на висоті 1 м

На рис. 2.4 та рис. 2.5 зображено мапа температури та швидкості повітряного потоку на висоті 2 м:

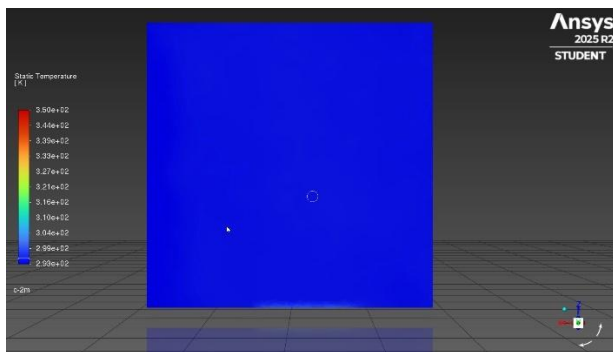


Рисунок 2.4 – Контурна карта температури на висоті 2 м

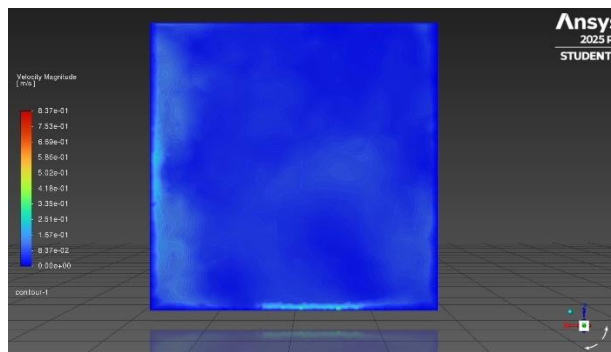


Рисунок 2.5 – Контурна карта швидкості повітря на висоті 2 м

На рис. 2.6 та рис. 2.7 зображено мапа температури та швидкості повітряного потоку на висоті 3 м:

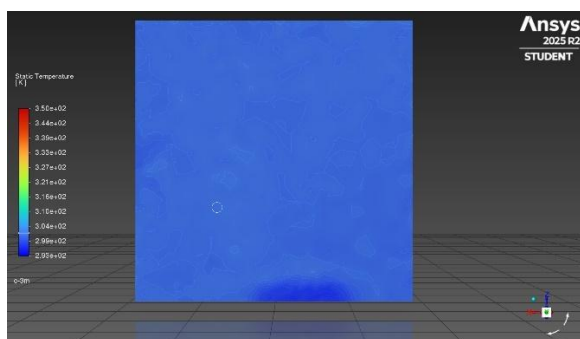


Рисунок 2.6 – Контурна карта температури на висоті 3 м

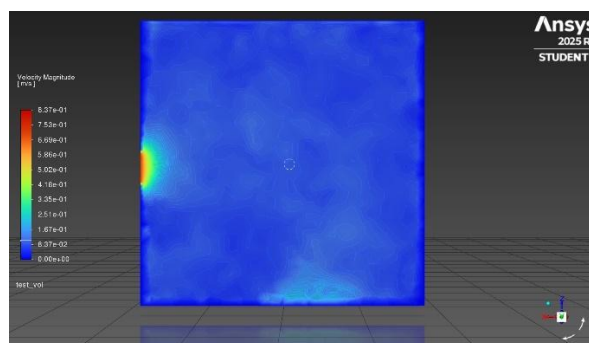


Рисунок 2.7 – Контурна карта швидкості повітря на висоті 3 м

2.2 Розробка математичної моделі температурного градієнту

Комп'ютерне моделювання, здійснене в ANSYS Fluent, продемонструвало чітко виражену закономірність: температура всередині приміщення змінюється переважно у вертикальному напрямку, а на одному висотному рівні її розподіл є відносно рівномірною. Така поведінка теплового поля зумовлена явищем стратифікації, коли тепле повітря підіймається вгору, формуючи температурний градієнт. У зв'язку з цим було прийнято доцільне спрощення – розгляд одномірної температурної залежності від висоти, яка зберігає необхідний рівень точності й значно полегшує подальший математичний аналіз.

Були отримані експериментальні значення температури на дев'яти рівнях з кроком 0.4 м, в діапазоні від 0.4 м до 3.6 м (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Експериментальні дані температури отримані з симуляції

$z, \text{ м}$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
$T, \text{ K}$	294.13	294.13	294.71	294.71	295.28	295.85	299.27	305.0	308.4

2.2.1 Вибір математичної моделі зміни температури залежно від висоти

Для побудови моделі було розглянуто два типи функціональних

залежностей: модель ($T(z) = a \cdot e^{bz} + c$) та модель ($T(z) = \frac{L}{1+e^{-k(z-z_0)}} + c$).

Для наближення моделей було розроблено програму на мові Python із застосуванням функціоналу `curve_fit` пакету SciPy.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit
import pandas as pd
from IPython.display import display

z = np.array([0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6])
t = np.array([294.13, 294.13, 294.71, 294.71, 295.28, 295.85,
299.27, 305.0, 308.4])

def exponential(z, a, b, c):
    return a * np.exp(b * z) + c

def logistic(z, L, k, z0, c):
    return L / (1 + np.exp(-k * (z - z0))) + c

popt_exp, _ = curve_fit(exponential, z, t, p0=(1, 0.1, 294))
popt_log, _ = curve_fit(logistic, z, t, p0=(15, 1, 2, 294))

print(popt_exp, popt_log)

z_fit = np.linspace(min(z), max(z), 200)
t_exp = exponential(z_fit, *popt_exp)
t_log = logistic(z_fit, *popt_log)

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.scatter(z, t, label='Data', color='black')
plt.plot(z_fit, t_exp, label='Exponential Fit', linestyle='-.')
plt.plot(z_fit, t_log, label='Logistic Fit', linestyle=':')
plt.xlabel('Height z (m)')
```

```

plt.ylabel('Temperature T (K)')
plt.title('Temperature vs Height with Model Fits')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

z_pred = z
df_results = pd.DataFrame({
    "Height z (m)": z_pred,
    "Actual T (K)": t,
    "Exponential T(z)": exponential(z_pred, *popt_exp),
    "Logistic T(z)": logistic(z_pred, *popt_log)
})

display(df_results)

```

2.2.2 Перша математична модель зміни температури на різній висоті всередині приміщення відпочинку кажанів

Перша модель температурного розподілу базується на припущенні про експоненційне зростання температури у вертикальному напрямку внаслідок дії теплового джерела, розміщеного у нижній частині об'єму. Такий тип залежності описується рівнянням:

$$T(z) = a + e^{bz} + c$$

де: $T(z)$ – температура на висоті z метрів,

a – амплітудний коефіцієнт,

b – параметр крутості росту,

c – початкове зміщення (температурна база).

На основі аналізу, проведеного за методом найменших квадратів на основі CFD-даних, були визначені наступні параметри моделі:

$$a = 0,21; b = 1,198; c = 20,34$$

Таким чином, підставивши ці значення, отримаємо конкретне рівняння для даного випадку:

$$T(z) = 0,21 + e^{1,417z} + 20,34$$

2.2.3 Аналіз розрахункових даних для першої математичної моделі

У таблиці 2.2 наведено порівняння експериментальних даних отриманих за допомогою CFD-моделювання зі значеннями обчисленими за допомогою першої моделі.

Таблиця 2.2 – Результати обчислення першої моделі

Висота, м	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00	2.40	2.80	3.20	3.60
$T_{CFD}, ^\circ C$	20,98	20,98	21,56	21,56	22,13	22,70	26,12	31,85	35,25
$T_{exp}, ^\circ C$	20,61	20,82	21,15	21,70	22,58	24,00	26,29	30,00	35,98
$\Delta T, ^\circ C$	0.37	0.16	0.41	0.14	0.45	1.30	0.17	1.85	0.73
$\delta T, \%$	1,77%	0,78%	1,88%	0,65%	2,03%	5,73%	0,67%	5,81%	2,07%

Середнє значення абсолютної похибки:

$$\Delta T \approx 0,62$$

Обчислимо коефіцієнт детермінації.

Середнє значення вибірки: $\bar{y} \approx 24,79 ^\circ C$

Сума квадратів залишків регресії: $SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \approx 6,23$

Загальна сума квадратів: $SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \approx 222,37$

Коефіцієнт детермінації: $R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \approx 0,97$

Обчислений коефіцієнт детермінації вказує на досить високу точність моделі.

На рисунку 2.8 зображено графічне порівняння даних CFD-моделювання з даними обчисленими за використання побудованої моделі.

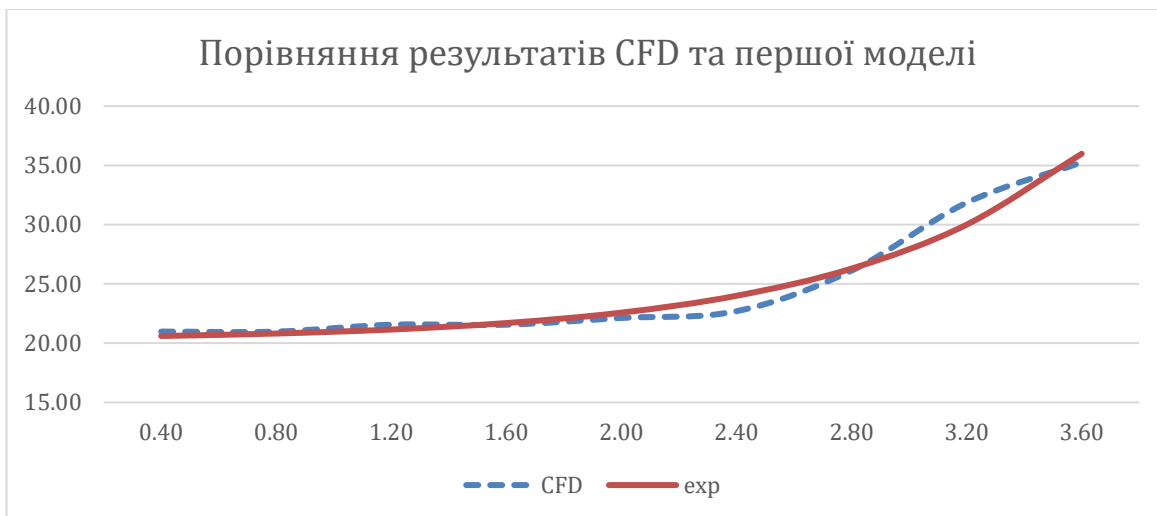


Рисунок 2.8 – Графік результатів CFD-моделювання та першої моделі

На рисунку 2.9 зображено графік абсолютного відхилення моделі:

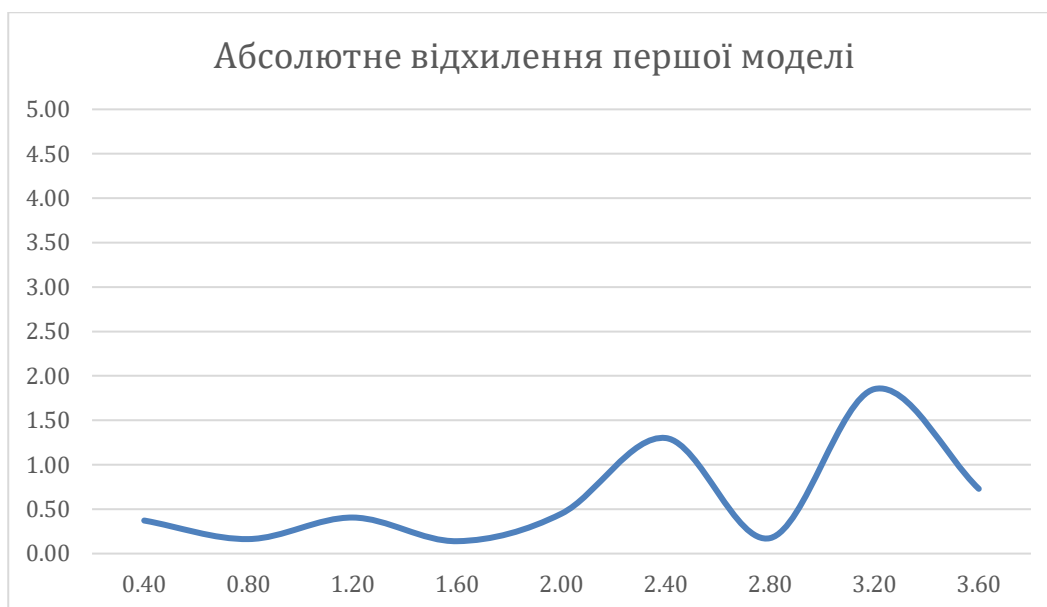


Рисунок 2.9 – Графік абсолютного відхилення моделі

Модель демонструє досить високу збіжність з експериментальними даними на початку кривої, проте стає менш точною у другій половині вибірки.

2.2.4 Друга математична модель зміни температури на різній висоті всередині приміщення відпочинку кажанів

Друга модель описує функціональну залежність із характерним S-подібним профілем, який добре відповідає ситуації, коли змінна спочатку

зростає експоненційно, але згодом досягає зони насичення. Формула другої моделі має вигляд:

$$T(z) = \frac{L}{1 + e^{-k(z-z_0)}} + c$$

де: $T(z)$ – температура на висоті z ,

L – амплітуда зміни температури,

k – крутість переходу,

z_0 – координата точки перегину

c – початкове зміщення (температурна база).

У дослідженні розподілу температури в приміщенні наведена функція природно моделює фазу швидкого зростання температури (в середній частині об'єму) та поступове уповільнення цього процесу ближче до верхньої межі. Це є фізично обґрунтованим, оскільки повітряне середовище має обмежену здатність до акумуляції тепла, а вплив джерела нагріву зменшується зі зростанням відстані.

На відміну від першої моделі, друга функція враховує ефект насичення температури, що спостерігався у CFD-сценаріях, особливо на рівнях понад 3.2 м. Вона забезпечує кращу якісну та кількісну відповідність емпіричним даним у всьому робочому діапазоні висоти.

На основі аналізу, проведеного за методом найменших квадратів на основі CFD-даних, були визначені наступні параметри моделі:

$$L = 15,5204; k = 3,716; z_0 = 3; c = 21,32$$

Таким чином, підставивши ці значення, отримаємо конкретне рівняння

для даного випадку:

$$T(z) = \frac{15,5204}{1 + e^{-3,716(z-3)}} + 21,32$$

2.2.5 Аналіз розрахункових даних для другої математичної моделі

У таблиці 2.3 наведено порівняння експериментальних даних отриманих за допомогою CFD-моделювання зі значеннями обчисленими за допомогою другої моделі.

Таблиця 2.3 – Результати моделювання другої функції

Висота, м	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00	2.40	2.80	3.20	3.60
$T_{CFD}, ^\circ C$	20,98	20,98	21,56	21,56	22,13	22,70	26,12	31,85	35,25
$T_{logi}, ^\circ C$	21,32	21,33	21,34	21,40	21,68	22,79	26,23	31,74	35,30
$\Delta T, ^\circ C$	0.34	0.35	0.22	0.16	0.45	0.09	0.11	0.11	0.05
$\delta T, \%$	1,61%	1,62%	1,03%	0,73%	2,07%	0,40%	0,41%	0,34%	0,13%

Середнє значення абсолютної похибки:

$$\Delta T \approx 0,21$$

Обчислимо коефіцієнт детермінації.

Середнє значення вибірки: $\bar{y} \approx 24,79 ^\circ C$

Сума квадратів залишків регресії: $SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \approx 0,55$

Загальна сума квадратів: $SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \approx 222,37$

Коефіцієнт детермінації: $R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \approx 0,997$

Обчислений коефіцієнт детермінації вказує на практично повну збіжність моделі.

На рисунку 2.10 зображено графічне порівняння даних CFD-моделювання з даними обчисленими за використання побудованої моделі.

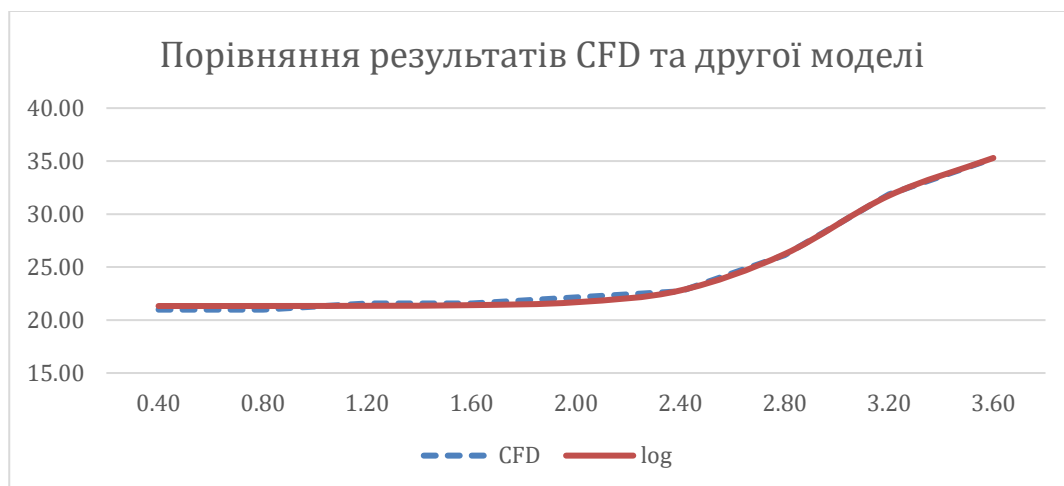


Рисунок 2.10 - Графік результатів CFD-моделювання та другої моделі

На рисунку 2.11 зображено графік абсолютного відхилення моделі:

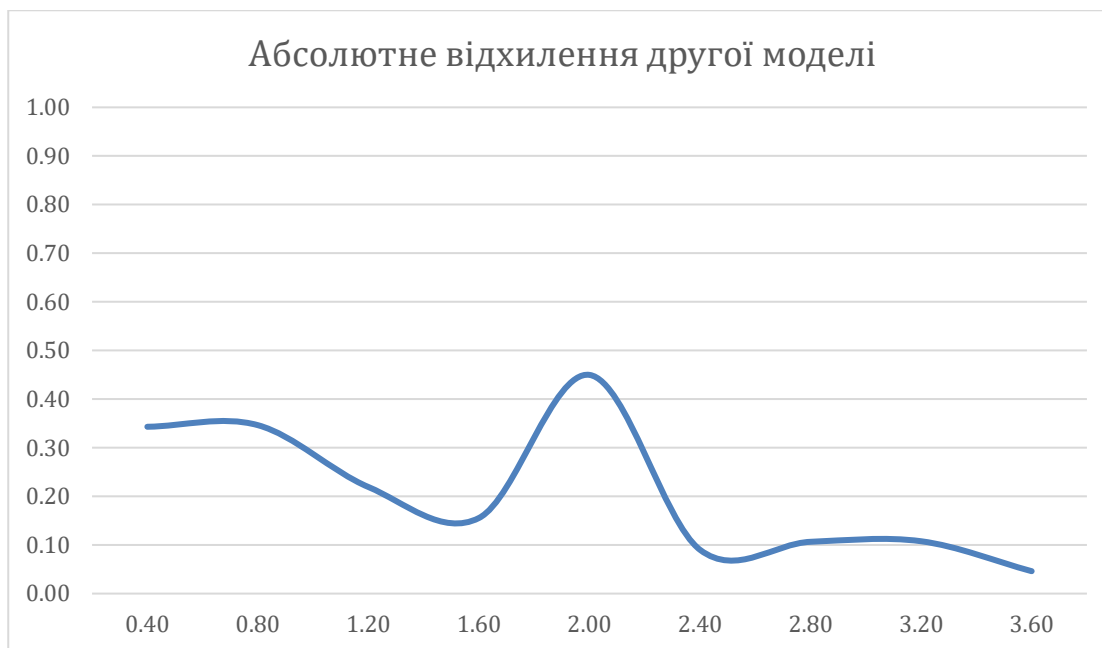


Рисунок 2.11 - Графік абсолютного відхилення моделі

Друга модель забезпечує найкращу відповідність CFD-даним серед розглянутих моделей. Її перевагою є як висока точність, так і відповідність фізичній сутності процесу теплоперенесення у закритих об'ємах із локальним джерелом тепла. З огляду на це, вона рекомендована як основна аналітична модель для подальшої інтеграції в інформаційно-вимірювальні системи.

Висновки до розділу 2

Чисельне моделювання підтвердило, що в об'єкті формується переважно вертикальний температурний градієнт за відносно малих горизонтальних відхилень (до 2 °C), а швидкість руху повітря в основному об'ємі стабілізується в межах 0,02–0,08 м/с, що дозволяє опиратися на «висотну» модель розподілу температури як на базову для подальших інженерних рішень.

Порівняння показало, що перша модель зберігає прийнятну точність лише на початковій ділянці, але гірше описує дані в другій половині діапазону. Натомість друга модель дає найкращу відповідність CFD-даним і є фізично узгодженою з процесом теплоперенесення в замкненому об'ємі з локальним джерелом тепла, тому її доцільно приймати як основну аналітичну модель для інтеграції в ІВС.

Таким чином, отримано компактний аналітичний опис, який може бути використаний у програмній логіці для контролю режимів та оцінювання відхилень показників параметрів середовища під час експлуатації системи.

РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ СТРУКТУРИ ІВС ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ ДЛЯ КАЖАНІВ

3.1 Обґрунтування вибору технічних засобів для створення ІВС

Центральним елементом інформаційно-вимірювальної системи мікроклімату є керуючий пристрій, який одночасно виконує дві ролі: приймає сигнали від первинних перетворювачів та керує виконавчими пристроями. Для інсталяційних приміщень критичними є безперервність роботи, достатня кількість каналів введення для рознесених по об'єму датчиків, а також наявність стандартних інтерфейсів для інтеграції в систему верхнього рівня та підключення периферії.

Як кандидати розглядалися програмовані реле лінійки АКУТЕК, які найбільш близькі за класом та підходом до побудови компактних систем локальної автоматизації: ПР100, ПР200 та ПР102. ПР100 є привабливим для простих задач завдяки компактності та наявності RS-485, проте має обмеження по масштабуванню: доступні виконання на 12 або 20 каналів вводу-виводу, що для багатоточкового контролю мікроклімату швидко стає вузьким місцем, особливо якщо потрібно одночасно знімати кілька аналогових сигналів і керувати декількома виконавчими лініями.

ПР200 є більш «розширеним» рішенням з індикацією та годинником реального часу, підтримує підключення модулів розширення (до двох), а також допускає конфігурації з двома інтерфейсами RS-485 та роботою Modbus у режимах Master/Slave. За рахунок універсальності аналогових входів ПР200 може напряму працювати з сигналами 0...10 В, 4...20 мА та датчиками типу Pt1000, що добре узгоджується з вимогами ІВС. Водночас кількість аналогових входів у базовій конфігурації є меншою (до 4), а сумарний запас каналів у задачі з кількома зонами вимірювання може виявитися недостатнім

без залучення додаткових модулів.

З урахуванням вимог проєкту оптимальним є вибір АКУТЕК ПР102 як центрального пристрою ІВС. ПР102 орієнтований саме на задачі, де потрібна висока «щільність» каналів: заявлено 40 каналів вводу-виводу, при цьому передбачено 8 аналогових входів з підтримкою типових для промислової вимірювальної техніки сигналів (4...20 мА, 0...10 В) і прямою роботою з Pt1000, а також 2 аналогові виходи (4...20 мА або 0...10 В), що корисно для керування виконавчими пристроями з уніфікованим входом або для видачі керуючого сигналу на зовнішній регулятор. Дискретна частина дає можливість підключити кінцевики, кнопки, сигналізацію, реле або транзисторні ключі для комутації допоміжних ланцюгів.

Для інтеграції з периферією та побудови мережевої взаємодії ПР102 підтримує RS-485 з Modbus RTU/ASCII у режимах Master/Slave. Це дозволяє як опитувати зовнішні модулі чи датчики з Modbus-виходом, так і передавати параметри на верхній рівень (логування, диспетчеризація, НМІ). Також ПР102 допускає підключення до двох модулів розширення, що важливо як резерв на випадок розвитку системи або збільшення кількості контрольних точок у майбутньому.

Також важливим фактором є наявність ПР102 у складі матеріально-технічної бази кафедри, що надає можливість проводити експерименти в реальних умовах.

Таким чином, ПР102 забезпечує потрібний баланс між функціональністю, кількістю універсальних каналів, комунікаційними можливостями та резервом для розвитку системи. Саме тому у даній роботі програмоване реле АКУТЕК ПР102 приймається як базовий елемент програмно-технічного комплексу інформаційно-вимірювальної системи мікроклімату.

3.2 Підсистема ІВС для вимірювання температури повітря в інсталяційному приміщенні для кажанів

Температура є одним з найважливіших параметрів мікроклімату. Завданням підсистеми є не просто вимірювання, а забезпечення можливості створення та контролю просторового теплового градієнта в приміщенні.

3.2.1 Порівняльний аналіз та вибір типу датчика температури

Температура є базовим параметром мікроклімату, який безпосередньо визначає тепловий стан тварин і режим роботи обладнання. Важлива не лише сама точність вимірювання, а і відтворюваність показів у часі, стабільність при високій вологості, а також можливість безпосереднього підключення до аналогових входів контролера без складних проміжних перетворювачів.

У промислових системах автоматизації для вимірювання температури найчастіше застосовують три групи первинних перетворювачів: термопари, термістори та термоперетворювачі опору (RTD).

Термопари привабливі дуже широким діапазоном і високою стійкістю до перегріву. Проте їх сигнал має малу амплітуду, залежить від температури "холодного спаю" і потребує компенсації. У задачі контролю мікроклімату це означає складнішу обробку, більшу чутливість до похибок монтажу та гіршу повторюваність у вузькому робочому діапазоні.

Термістори (NTC або PTC) добре підходять для побутових і приладових застосувань, де потрібна висока чутливість у відносно вузькій області температур. Для системи, що працює безперервно і має вимоги до довготривалої стабільності, термістори менш зручні через виражену нелінійність, більший дрейф характеристик з часом і залежність від саморозігріву при невдалому режимі вимірювання.

Термоперетворювачі опору (RTD) на основі платини є промисловим стандартом для точних вимірювань у діапазоні, характерному для

мікроклімату приміщень. Їх перевага полягає у високій відтворюваності, передбачуваній характеристиці, добрій довготривалій стабільності та широкій номенклатурі конструктивних виконань під вологі середовища. Саме тому в межах даної роботи як базовий тип датчика температури обирається RTD.

У класі платинових RTD найбільш поширеними є Pt100 та Pt1000. Обидва варіанти мають подібну фізику та метрологічні властивості, однак відрізняються номінальним опором при 0 °C. Для практичної реалізації в інсталяції суттєвим є вплив опору з'єднувальних проводів. Чим менший номінальний опір чутливого елемента, тим помітніше на результаті вимірювання позначається додатковий опір лінії, особливо при двопровідному підключенні.

Датчик Pt1000 має у 10 разів більший номінальний опір, ніж Pt100, тому внесок опору проводів у відносному сенсі менший. Це спрощує монтаж, підвищує стійкість вимірювання до довжини кабелю та якості контактів, а також зменшує вимоги до компенсації лінії у випадках, коли застосування трипровідної або чотирипровідної схеми з якихось причин обмежене. З урахуванням цього, для даної системи приймається вибір на користь Pt1000.

Для експлуатації у вологому середовищі доцільно застосовувати датчик у герметичному зонді з нержавіючої сталі, з кабельним вводом і захистом не нижче IP67. Конструктивно важливо забезпечити, щоб зона чутливого елемента була відокремлена від електроніки та контактів, а сам датчик допускав очищення без пошкодження. Таке виконання зменшує ризики корозії та деградації ізоляції, що особливо актуально при тривалих режимах з високою відносною вологістю та можливими епізодами конденсації.

Отже, для підсистеми вимірювання температури найбільш обґрунтованим рішенням є застосування платинового термоперетворювача опору Pt1000 у герметичному виконанні. Вибір забезпечує потрібну точність і

стабільність у робочому діапазоні, зменшує вплив з'єднувальних проводів на результат вимірювання та узгоджується з архітектурою прийнятого програмно-технічного комплексу системи.

3.2.2 Вибір конкретної моделі датчика температури та її метрологічні характеристики

В рамках класу термоперетворювачів опору основними альтернативами є моделі Pt100 та Pt1000.

У Pt100 номінальний опір при 0°C дорівнює 100 Ом. Це історично більш поширений стандарт. Однак при використанні двопровідної схеми підключення, яку підтримує ПЛК100, опір з'єднувальних проводів додається до опору датчика, що вносить значну похибку у вимірювання, особливо при довгих лініях зв'язку.

Для Pt1000 номінальний опір становить 1000 Ом при 0°C. Завдяки вдесятеро вищому базовому опору, вплив опору з'єднувальних проводів на загальний результат вимірювання є значно меншим. Це робить Pt1000 набагато кращим вибором для систем, що використовують двопровідну схему підключення, оскільки це мінімізує похибку, що вноситься лінією зв'язку.

Для реалізації проєкту рекомендується використовувати герметизований термоперетворювач опору типу Pt1000. Клас точності А (похибка $\pm(0.15 + 0.002 \cdot |t|)$ °C) забезпечує високу точність вимірювань у цільовому діапазоні температур (21-30°C). Датчик повинен мати захищений корпус з нержавіючої сталі зі ступенем захисту не нижче IP67. Це захистить чутливий елемент від високої вологості та корозії.

3.2.3 Схема підключення датчиків температури до ПР102

ПР102 підтримує пряме підключення термоперетворювачів опору до своїх універсальних аналогових входів за двопровідною схемою.

Важливо врахувати, що при підключенні датчика типу «Термоопір» по

двопровідній схемі необхідно виконати компенсацію опору з'єднувальних проводів. Це пов'язано з тим, що опір мідних проводів додається до опору датчика, що вносить похибку у вимірювання. Ця компенсація виконується програмно на етапі програмування в середовищі AQLogic, де вводиться поправка, що відповідає опору лінії зв'язку.

3.3 Підсистема ІВС для вимірювання відносної вологості

Відносна вологість повітря разом із температурою визначає тепловий комфорт тварин і стабільність мікроклімату в приміщенні. Для видів, чутливих до порушення терморегуляції, відхилення вологості може призводити до зневоднення, погіршення стану слизових оболонок, а надлишок вологи сприяє розвитку грибків та бактерій. Тому канал вимірювання вологості має забезпечувати надійність у режимі 24/7 та бути придатним до експлуатації в умовах підвищеної вологості, можливих бризок і конденсації.

Під час вибору датчика вологості для інформаційно-вимірювальної системи ключовими є: точність у діапазоні 60...95 %RH, довготривала стабільність, наявність стандартного аналогового виходу 4–20 мА або 0–10 В для підключення до ПЛК, а також достатній ступінь захисту оболонки (не нижче IP65) і можливість обслуговування (очищення або заміна захисного фільтра, калібрування).

3.3.1 Порівняльний аналіз та вибір типу датчика вологості

У практиці вимірювання відносної вологості застосовуються різні принципи. Резистивні сенсори базуються на зміні опору гігроскопічного шару. Вони відносно дешеві, однак чутливі до забруднень, мають помітний дрейф при тривалій роботі у високій вологості та часто потребують частішої повірки. Датчики на основі теплопровідності (або теплових балансів) використовують залежність теплообміну від вмісту водяної пари, проте в більшості випадків орієнтовані на спеціалізовані задачі (газові суміші, високі температури) і є

надлишковими для поставленої задачі.

Еталонним методом є вимірювання точки роси дзеркальними гігрометрами, але такі прилади дорогі, вимогливі до обслуговування і нерациональні для постійної експлуатації в системі керування.

Найбільш поширеним рішенням у промисловій автоматизації є ємнісні полімерні сенсори, які поєднують достатню точність (порядку 1–3 %RH), швидкодію та прийнятну вартість. Для умов підвищеної вологості важливими стають конструктивні засоби захисту: змінні фільтри, рознесення електроніки та вимірювального елемента. З урахуванням зазначеного, для проєкту доцільно використовувати промисловий перетворювач вологості на основі ємнісного полімерного елемента із захистом не нижче IP65 та аналоговим виходом 4–20 мА або 0–10 В.

3.3.2 Порівняння датчиків вологості та вибір оптимального варіанту

На ринку доступний широкий перелік перетворювачів вологості, однак для даного проєкту розглядались лише моделі, що підтримують стандартні аналогові сигнали та мають виконання з захистом від пилу та вологи. У таблиці 3.1 наведено узагальнене порівняння кількох типових промислових рішень за основними параметрами і умовами експлуатації. У всіх наведених датчиків заявлено діапазон вимірюваної відносної вологості від 0% до 100% та клас захисту IP65, тому ці дані в таблиці не наводяться.

Таблиця 3.1 – Порівняльні характеристики промислових датчиків відносної вологості

Модель	Діапазон RH, %	Точність RH	Вихід	Живлення	Примітки
Е+Е EE210 (тип ТЗ, виносний зонд)	0...100	$\pm(1.3 + 0.003 \cdot RH)$ %RH; для >90	0–10 В або 4–20 мА (2 дроти), також RS485	15...36 В DC або 24 В AC/DC	Електроніка в зонді, покриття сенсора,

		%RH до ± 2.3 %RH		(залежно від версії)	заявлена стійкість до конденсації; зручне налаштування і калібрування
Vaisala HMT120	0...100	± 1.5 %RH (0–90 %RH при 0...40 °C); до ± 2.5 %RH (90–100 %RH)	4–20 мА (2 дроти)	10...30 В DC (петля)	Змінний зонд, висока стабільність; придатний для довгих ліній 4–20 мА
Rotronic HygroFlex5 (HF5)	0...100 (залежно від зонду)	$\pm 0.8... \pm 1.2$ %RH (залежно від типу зонду)	0–10 В або 0(4)–20 мА (масштабовано)	широкий діапазон (залежно від модифікації)	Гнучка конфігурація, вибір промислових зондів; доцільний при потребі розширених функцій
S+S HYGRASGAR D AFF/AFTF	0...100	типово ± 2.0 %RH (20...80 %RH) або ± 1.8 %RH (10...90 %RH)	0–10 В або 4–20 мА	15...36 В DC або 24 В AC	Обмеження: допустима вологість <95 %RH і лише без випадіння конденсату, тому потребує коректного місця встановлення
Sauermann (Kimo) TH210-R	0...100	паспортні значення залежать від виконання; експлуатація декларується в не-конденсаційних умовах	0–10 В або 0/4–20 мА (2 канали)	24 В AC/DC або 100–240 В AC	Зручне налаштування та додаткові розрахункові параметри, але як і багато HVAC-

					рішень, орієнтований на не- конденсацій ні режими
--	--	--	--	--	---

З урахуванням критеріїв проєкту найбільш обґрунтованим вибором є перетворювач E+E EE210 у виконанні з виносним зондом. Датчик має промисловий ступінь захисту IP65, передбачає використання змінних фільтрів і конструктивно орієнтований на роботу у забруднених та вологих середовищах, включно з режимами з можливим утворенням конденсату.

3.4 Вимірювання освітленості в інсталяційному приміщенні

Для забезпечення комфортних умов утримання нільських криланів необхідно підтримувати відповідний рівень освітленості вдень і вночі. Ці кажани є нічними тваринами, які у природі уникають навіть слабого штучного світла. Зокрема, дослідження показують, що кажани уникають територій з освітленістю лише $\sim 3,6$ люкс, адже яскравість повного місяця сягає близько 1 люкс [37]. Рекомендовано обмежувати нічний рівень освітлення на рівні приблизно 0,2 люкс, що є близьким до яскравості місячного світла, у місцях відпочинку кажанів [38].

Протягом нічного періоду слід підтримувати майже повну темряву – лише слабе фонове «місячне» світло $\sim 0,1-0,5$ люкс, щоб не дезорієнтувати тварин і не заважати їх поведінці. У денний період також необхідна темрява або дуже приглушене світло. В умовах неволі денний цикл зазвичай імітують приглушеним освітленням: наприклад, використовують флуоресцентні лампи вдень, а вночі – лампи з синіми фільтрами для імітації місячного світла [12]. Важливо, щоб вдень у вольєрі були затінені ділянки чи штучні «печери», де освітленість зведена до мінімуму, даючи кажанам можливість сховатися у темряві [12]. Таким чином, діапазон освітленості, який потрібно контролювати, охоплює дуже низькі рівні – від повної темряви <1 люкс (уночі)

до, можливо, десятків люкс.

3.4.1 Типи датчиків освітленості

У сучасних системах вимірювання освітленості використовується кілька основних типів сенсорів, які різняться між собою як фізичними принципами, так і точністю, стабільністю та спектральною характеристикою. Найпростішими є фоторезистори (LDR), опір яких істотно змінюється залежно від кількості світла. У темряві їхній опір може сягати десятків мегомів, а під дією світла падати до сотень Ом [39]. Спектральна чутливість кадмій-сульфідних LDR добре узгоджується з фотопічною кривою людського ока, завдяки чому такі елементи загалом придатні для вимірювання освітленості саме в люксах [39]. Попри це, їм притаманна виразна нелінійність, потреба в індивідуальному калібруванні та високий час відгуку, який може тривати секунди [39]. Тому фоторезистори зазвичай застосовують там, де точність не є критичною, а швидкість зміни світлового середовища – низькою.

Більш виваженим підходом є використання фотодіодів – напівпровідникових елементів, що генерують електричний струм у відповідь на потік світла. Цей струм лінійно залежить від рівня освітленості [39], а сам фотодіод забезпечує дуже високу швидкодію, що вимірюється наносекундами [39]. Для перетворення малого фотоструму на корисну напругу застосовують трансімпедансні підсилювачі [39], які формують зручний для подальшої обробки сигнал і гарантують високу лінійність. Саме фотодіоди з корекційними фільтрами під стандарт CIE широко застосовують у професійних люксометрах [40].

Фототранзистори, у свою чергу, працюють за подібним принципом, але мають внутрішнє підсилення, завдяки чому створюють значно більший вихідний струм при тих же рівнях освітленості [39]. Це дозволяє спрощувати вимірювальні схеми – достатньо контролювати напругу на

навантажувальному резисторі. Проте така чутливість досягається ціною зниженої лінійності та більшої температурної залежності. Існують спеціалізовані фототранзистори зі спектральною корекцією, серед яких добре відомий ТЕРТ4400 з піковою чутливістю 570 нм [41], призначений саме для заміни LDR у задачах вимірювання освітленості.

Найбільш завершеним технічним рішенням у сфері вимірювання світла є інтегральні датчики освітленості, що поєднують фотодіод та вбудований підсилювач. Приклади таких модулів – сенсори серії TSL250...TSL257, які безпосередньо видають напругу, пропорційну освітленості, що робить їх готовими до підключення до аналогових входів ПЛК (наприклад, через вхід 0–10 В) [42]. Для промислових застосувань існують також датчики у вигляді повноцінних трансмітерів, які видають стандартизований сигнал 4–20 мА або 0–10 В для діапазону 0...Х люкс [43]. Такі пристрої вже містять і корекцію спектральної чутливості, і стабільну лінійну характеристику. У професійних люксметрах (наприклад, PCE-LXT), що побудовані саме на фотодіоді з СІЕ-фільтром, точність становить близько $\pm 5\%$ у всьому діапазоні 0...50000 лк [40], а застосовані фільтри забезпечують коректне відтворення фотометричної кривої чутливості ока.

Таким чином, фоторезистори можна вважати найбільш простими, але найменш точними елементами. Фототранзистори пропонують вищу чутливість, однак поступаються у стабільності та лінійності. Фотодіоди в поєднанні з підсилювачем забезпечують найкраще поєднання швидкодії, точності та спектральної достовірності. Найзручнішими для промислових систем залишаються інтегральні датчики та люкс-трансмітери з виходом 4–20 мА: вони не лише забезпечують високу метрологічну якість, але й дозволяють безпосередньо включати їх у вимірювальні канали без додаткової схемотехніки [43].

3.4.2 Огляд датчиків освітленості та вибір оптимального рішення

Для вимірювання рівня освітленості необхідно використовувати датчики, які відповідають низці технічних вимог: наявність аналогового виходу (0–10 В або 4–20 мА), чітка передатна характеристика у вигляді залежності сигналу від значення освітленості (у люксах), робочий діапазон в межах 0–1000 лк, придатність до роботи у вологому середовищі, а також наявність технічної документації з параметрами точності, спектральної чутливості та захисту корпусу. У таблиці 3.2 наведено оглянуті варіанти датчиків освітленості.

Таблиця 3.2 – Огляд технічних характеристик датчиків освітленості

Модель (виробник)	Вихідний сигнал і діапазон	Похибка	Спектральна чутливість та принцип дії	Умови експлуатації
SLO320 (Schneider Electric)	4–20 мА або 0–10 В; діапазони 0–400 лк або 0–20 000 лк (перемикаються джампером); вихід лінійний [44]	±5 % при 25 °С	Фотодіод із спектральною корекцією згідно кривої $V(\lambda)$, пік ≈ 600 нм; коригована косинусна характеристика	IP65, температура – 20...+70 °С
PHOTASGAR D AHKF (S+S Regeltechnik, Німеччина)	4–20 мА або 0–10 В; шість діапазонів (від 0–500 лк до 0–60 000 лк), перемикаються DIP-перемикачем [45]	<5 % типово	Фотодіод з оптичним фільтром для відповідності $V(\lambda)$, чутливість 350–820 нм, з косинусною корекцією	IP65/IP67, температура – 30...+70 °С
RS-GZ / CWT (Renke / ComWinTop, Китай)	4–20 мА, 0–10 В, 0–5 В або RS485 Modbus; доступні моделі з діапазонами від 0–2000 до 0–200 000 лк; вихід лінійний [46]	±7 % при 25 °С	Фотодіод під прозорим куполом; калібрований у люксах; час відгуку $\sim 0,1$ с	IP65, температура – 40...+60 °С, вологість до 80 % RH

3.4.4 Рекомендований вибір датчика освітленості для інтеграції в ІВС

Усі представлені датчики можуть бути інтегровані в інформаційно-вимірювальну систему на базі ПЛК виробництва «АКУТЕК» завдяки

наявності стандартних аналогових виходів. Найбільш збалансованим за сукупністю параметрів є датчик PHOTASGARD АНKF, який поєднує високу точність, гнучкість вибору діапазону, адаптацію до спектру видимого світла та надійний герметичний корпус. Його робочий діапазон 0–500 лк добре відповідає умовам завдання, а варіанти з 4–20 мА або 0–10 В виходом дозволяють безпосереднє підключення до аналогового входу ПЛК.

Альтернативним рішенням є модель SLO320 від Schneider Electric, яка має перемикач діапазону та фотометричну корекцію. Її доцільно використовувати у випадках, коли освітленість у середовищі суттєво змінюється або потрібна сумісність з зовнішніми системами автоматизації.

Також до уваги можна брати китайські промислові моделі RS-GZ / CWT, які при зниженій вартості забезпечують базові вимоги щодо діапазону та виходу. Проте їх використання доцільне лише за умови обмеженого бюджету, а встановлення слід здійснювати з урахуванням обмежень щодо вологості та конденсації.

Найбільш технічно придатним для умов дослідження є датчик PHOTASGARD АНKF, що забезпечує відповідний діапазон, спектральну відповідність $V(\lambda)$, коректну геометрію чутливості та надійну роботу у вологому середовищі. Він легко інтегрується в ПЛК-систему без потреби додаткових перетворювачів та забезпечує необхідну точність для подальшого використання даних у задачах моніторингу та керування мікрокліматом.

3.5 Розробка структурної схеми ІВС

На рисунку 3.1 показано структурну схему ІВС, що включає всі обрані компоненти.

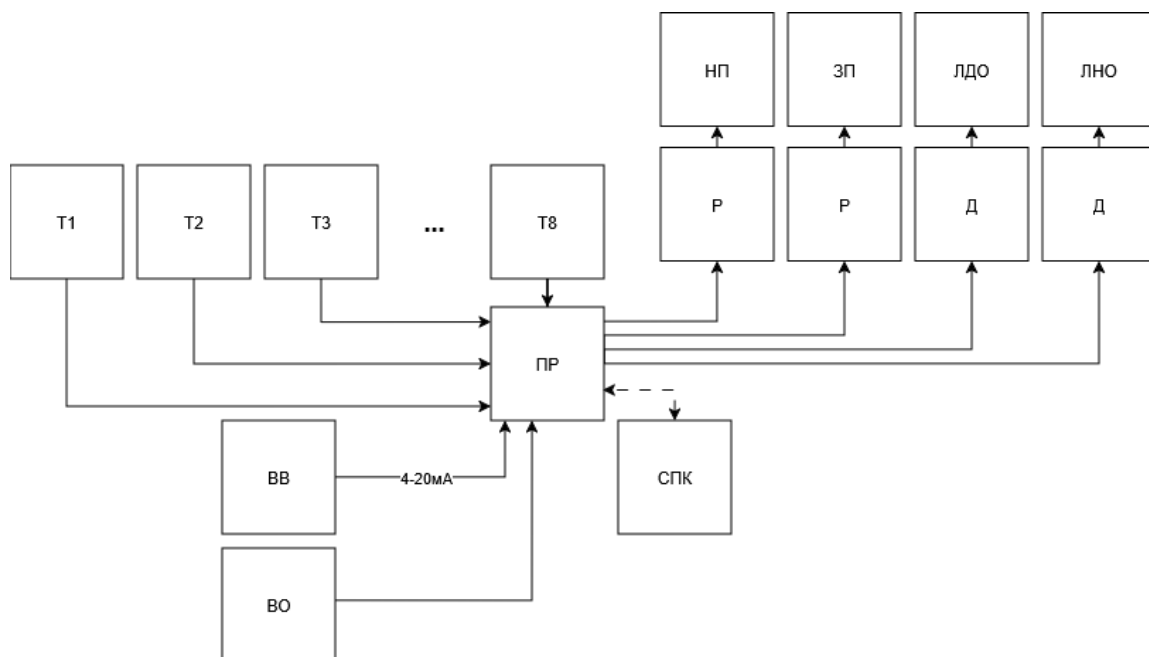


Рисунок 3.1 – Структурна схема ІВС контролю мікроклімату

На схемі наведено: T1 – T8 – терморезистивні вимірювачі температури, ВВ – вимірювач вологості, ВО – вимірювач освітленості, ПР – програмоване реле, СПК – сенсорна панель керування, Р – реле, НП – нагрівач повітря, ЗП – зволожувач повітря, Д – диммер, ЛДО – лампа денного освітлення, ЛНО – лампа нічного освітлення.

3.6 Розробка програмного забезпечення ІВС та принцип її роботи

Алгоритм функціонування програмованих реле ПР визначається програмою користувача, яка створюється в середовищі AQLogic. Мовою програмування середовища є мова функціональних блоків або функції користувача на мові ST, які відповідають стандарту MEK 61131-3 [47].

Розділимо програму на дві підсистеми: система вимірювання та система автоматизації.

Система вимірювання знімає дані з 8 датчиків температури, 1 датчика вологості та 1 вимірювача освітленості.

На рисунку 3.4 зображено частину програми на мові FBD, що відповідає за підключення датчиків температури.

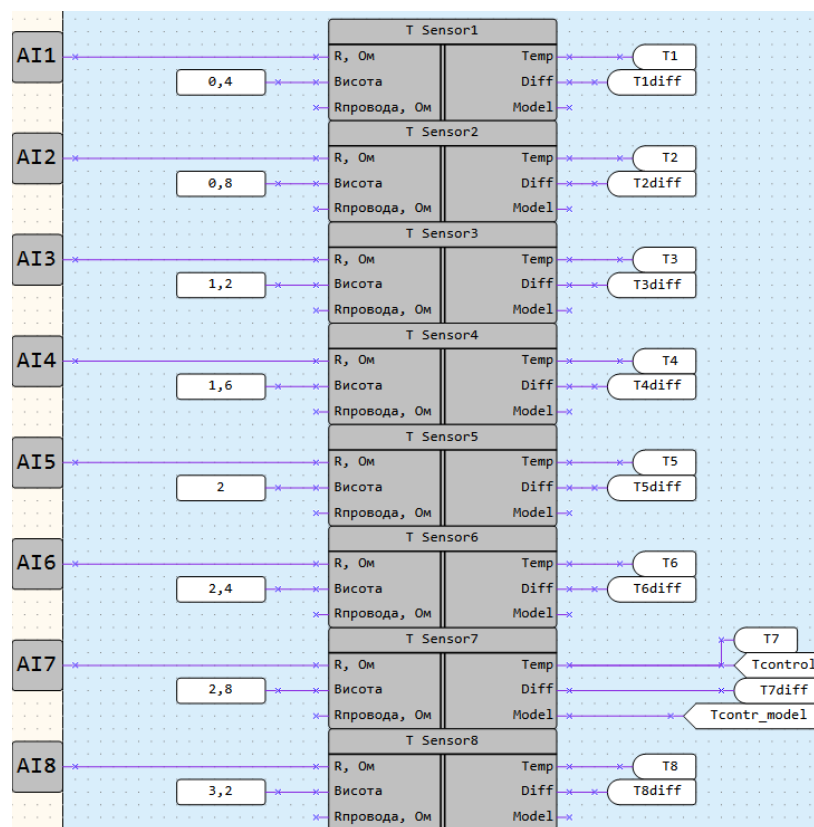


Рисунок 3.4 – Програма підключення датчиків температури

Обрані датчики вологості та освітленості видають стандартний сигнал 4-20 мА, що пропорційно масштабується на заданий в паспорті діапазон вимірювання. На рисунку 3.5 зображена конфігурація входу контролера для датчика вологості.

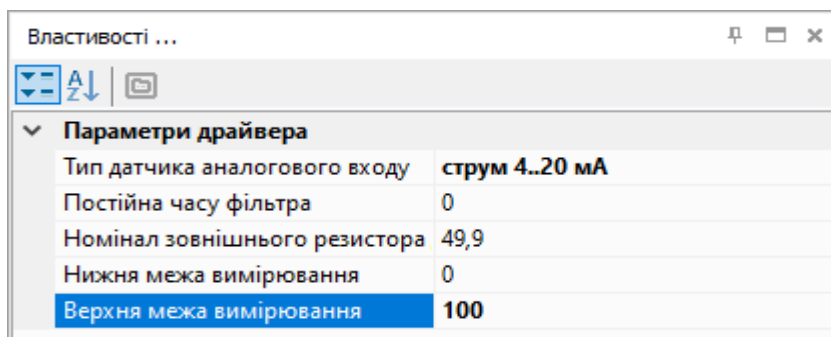


Рисунок 3.5 – Налаштування масштабування сигналу датчика вологості

Вхідний сигнал масштабується до діапазону 0-100% відносної вологості, як вказано в паспорті.

Аналогічна конфігурація для датчика освітленості вказана на рисунку 3.6.

▼ Параметри драйвера	
Тип датчика аналогового входу	струм 4..20 мА
Постійна часу фільтра	0
Номінал зовнішнього резистора	49,9
Нижня межа вимірювання	0
Верхня межа вимірювання	500

Рисунок 3.6 – Налаштування масштабування сигналу датчика вологості

Датчик освітленості налаштований для роботи в режимі вимірювання в діапазоні 0-500 лк.

Підсистема автоматизації відповідальна за керування нагрівачем, зволожувачем та освітленням. За опорну висоту, відносно якої буде здійснюватися керування нагрівачем обрано 2,8 метра, оскільки передбачається що на ній буде розміщено місце для відпочинку тварин. На основі апроксимації (розділ 2.7.4) для цієї висоти визначена температура 26,1 °C. На рисунку 3.7 наведено підпрограму керування нагрівачем.

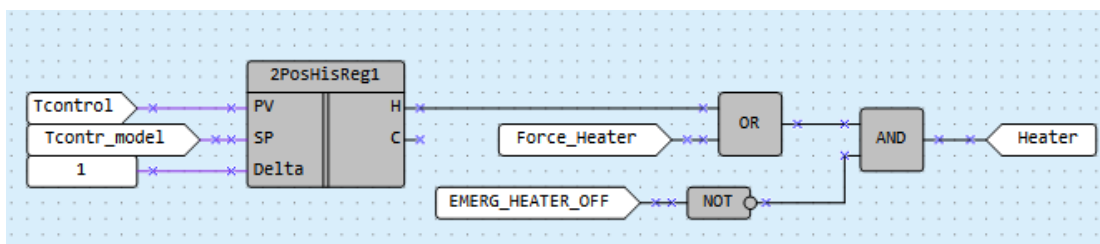


Рисунок 3.7 – Підпрограма керування нагрівачем

У підпрограмі використовується наданий разом з середовищем макрос

що реалізовує гістерезис, в якості температури спостереження використовується датчик на висоті, 2,8м, в якості уставки використано значення апроксимації для цієї ж висоти. Допустиме відхилення задано на рівні 1 °C. Також передбачено можливість ручного ввімкнення нагрівача та екстреного вимкнення нагрівача використовуючи підключені фізичні перемикачі, або через протокол Modbus.

На рисунку 3.8 зображено підпрограму керування зволожувачем.

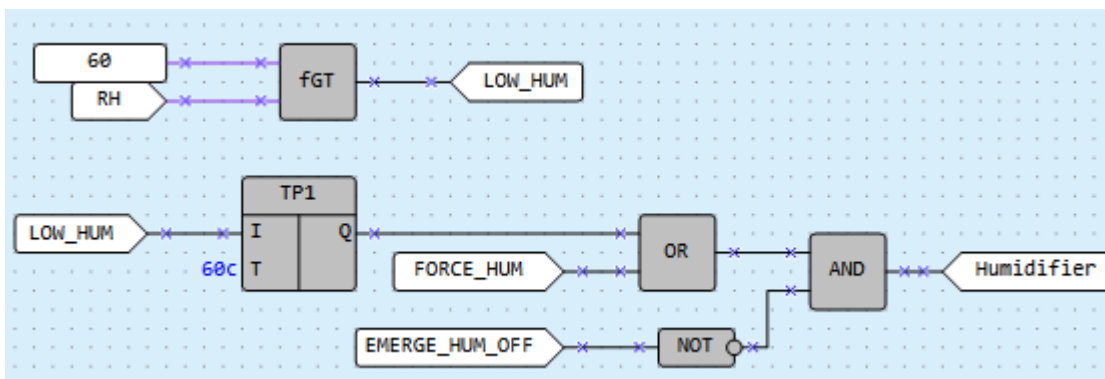


Рисунок 3.8 – Підпрограма керування зволожувачем

Коли виміряне значення відносної вологості стає меншим за 60% програма запускає таймер який вмикає зволожувач на 60 секунд. По аналогії з нагрівачем передбачено можливість примусового увімкнення/вимкнення пристрою.

Система освітлення відповідає за забезпечення комфортного рівня освітлення для тварин протягом доби та працює за принципом зворотного світлового циклу. Для цього було розроблено орієнтовний графік освітлення, наведений у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Графік освітлення в інсталяційному приміщенні

Час (Реальний)	Біла лампа %	Синя лампа %	Що відбувається
08:00 – 08:10	75%	0%	Початок "Заходу сонця" (підготовка до відкриття)

08:10 – 08:20	50%	25%	Сутінки, кажани прокидаються
08:20 – 08:30	25%	50%	Глибокі сутінки
08:30 – 19:30	0%	80%	ДЕНЬ (Зоопарк відкритий) – Кажани активні
19:30 – 19:40	25%	50%	Початок "Світанку" (зоопарк закривається)
19:40 – 19:50	50%	25%	Світає, кажани засинають
19:50 – 20:00	75%	0%	Майже повний день
20:00 – 08:00	100%	0%	НІЧ (Зоопарк закритий) – Кажани сплять

Наведена дозволяє визначити 8 режимів роботи освітлення, на рисунку 3.9 наведена підпрограма яка за допомогою вбудованих таймерів конвертує поточний час в відповідний йому режим роботи системи освітлення.

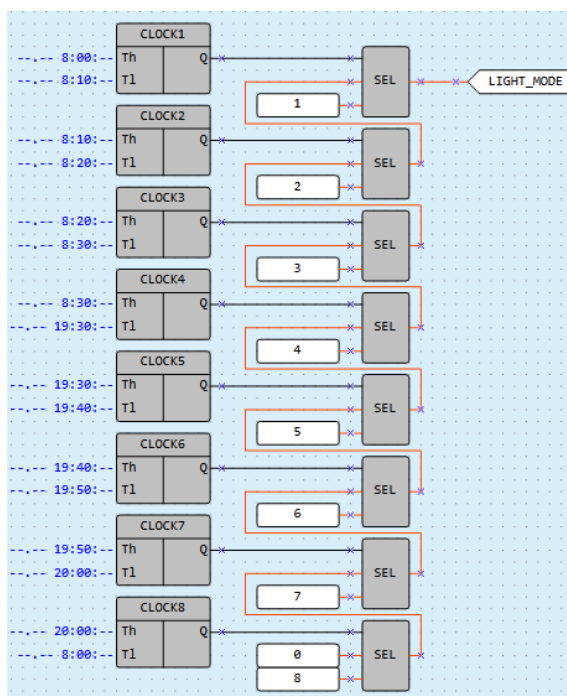


Рисунок 3.9 – Підпрограма визначення режиму освітлення

На основі цього розкладу було створено два блоки у вигляді функцій на ST, що конвертують визначений режим роботи освітлення у значення потужності кожної з ламп.

```
function NIGHT_LAMP_POWER: uint;
var_input
    MODE : uint;
end_var
```

```

case MODE of
1: NIGHT_LAMP_POWER := 0;
2: NIGHT_LAMP_POWER := 25;
3: NIGHT_LAMP_POWER := 50;
4: NIGHT_LAMP_POWER := 80;
5: NIGHT_LAMP_POWER := 50;
6: NIGHT_LAMP_POWER := 25;
else
    NIGHT_LAMP_POWER := 0;
end_case
end_function
function DAY_LAMP_POWER: uint;
var_input
    MODE : uint;
end_var

```

```

case MODE of
1: DAY_LAMP_POWER := 75;
2: DAY_LAMP_POWER := 50;
3: DAY_LAMP_POWER := 25;
4: DAY_LAMP_POWER := 0;
5: DAY_LAMP_POWER := 25;
6: DAY_LAMP_POWER := 50;
7: DAY_LAMP_POWER := 75;
8: DAY_LAMP_POWER := 100;
else
    DAY_LAMP_POWER := 0;
end_case
end_function

```

Наведені функції використовуються у програмі у вигляді звичайних блоків (рис. 3.10).

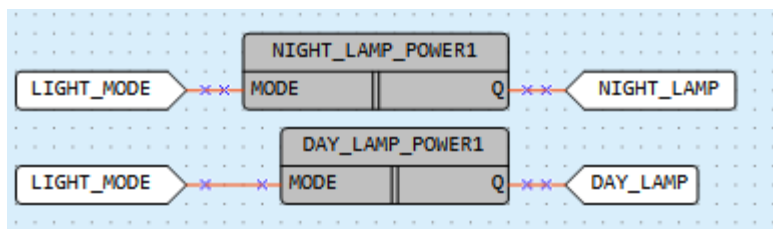


Рисунок 3.10 – Застосування блоків обчислення потужності ламп

3.7 Обчислення невизначеності вимірювального каналу температури

Вимірювальний канал температури інформаційно-вимірювальної системи складається з платиного терморезистивного перетворювача Pt1000 класу В за ІЕС 60751 і універсального аналогового входу програмованого реле ПР102, налаштованого на вимірювання сигналу датчика Pt1000. Робочий діапазон температур у приміщенні приймаємо, наприклад, 15...40 °С, розрахунок ведемо для типової робочої точки $t = 30$ °С.

Для такого каналу доцільно врахувати такі основні складові похибки:

1. похибка датчика температури
2. похибка аналогового входу ПР102 у режимі вимірювання терморезисторів
3. похибка від опору з'єднувальних проводів і схеми підключення.

Для платинових термометрів опору Pt100/Pt1000 класу В стандарт ІЕС 60751 задає граничну похибку за температурою як $[\pm(0,3 + 0,005 \cdot |t|)]$ °С.

Для точки $t = 30$ °С:

$$\Delta t_{\text{датч}} = \pm(0,3 + 0,005 \cdot 30) = \pm 0,45 \text{ °С.} \quad (3.1)$$

$$\delta t_{\text{датч}} = \frac{0,45 \text{ °С}}{30 \text{ °С}} \cdot 100\% = 1,5\% \quad (3.2)$$

За рівномірного закону розподілу відповідна стандартна невизначеність дорівнює:

$$u_{\text{датч}} = \frac{\delta t_{\text{датч}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,45}{\sqrt{3}} \approx 0,26 \text{ °С} \quad (3.3)$$

У вимірювальному каналі температури датчик Pt1000 підключається до ПР102 через універсальний дискретно-аналоговий вхід типу «ДАТ». В аналоговому режимі 2 цей вхід працює як омметр з діапазоном вимірювання 0...300 кОм. У таблиці характеристик універсальних дискретно-аналогових входів для режиму 2 наведені такі паспортні дані: розрядність АЦП 12 біт, значення одиниці молодшого розряду для температурних датчиків не більше 1 °С, а також межа основної наведеної похибки для датчиків опору 0...150 кОм, не більше $\pm 1\%$.

Для датчиків типу Pt1000 ($\alpha = 0,00385\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) лінійна апроксимація виглядає наступним чином:

$$R(t) \approx 1000 \cdot (1 + 0,00385 \cdot t) \quad (3.4)$$

Для точки $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$R(30) \approx 1000 \cdot (1 + 0,00385 \cdot 30) = 1115,5\text{ Ом.} \quad (3.5)$$

Тоді паспортна межа похибки по опору:

$$\Delta R_{\text{вх}} = \pm 0,01 \cdot 1115,5 \approx \pm 11,2\text{ Ом} \quad (3.6)$$

Для перетворення цієї похибки у похибку за температурою використовуємо чутливість Pt1000 у цій області температур. При лінійному наближенні:

$$\frac{dR}{dT} \approx 1000 \cdot \alpha = 3,85\text{ Ом}/^{\circ}\text{C} \quad (3.7)$$

Відповідна межа температурної похибки аналогового входу становить:

$$\Delta t_{\text{вх}} = \frac{\Delta R_{\text{вх}}}{dR/dT} \approx \frac{11,2}{3,85} \approx \pm 2,9\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.8)$$

Оскільки в документації наведена саме межа основної похибки, а не статистичне стандартне відхилення, у подальшому припускаємо рівномірний закон розподілу похибки в інтервалі $\pm \Delta t$. Тоді стандартна невизначеність цієї складової дорівнює:

$$u_{\text{вх}} = \frac{\Delta t_{\text{вх}}}{\sqrt{3}} \approx \frac{2,9}{\sqrt{3}} = 1,67\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.9)$$

При застосуванні двопровідної схеми підключення Pt1000 опір

з'єднувальних проводів додається до опору датчика. Вхід вимірює сумарний опір кола, тому навіть сталий додатковий опір лінії живлення сприймається як еквівалентна зміна опору термоперетворювача і, відповідно, призводить до систематичного зсуву показів температури. Припустимо, що датчик буде підключено через мідну жилу довжиною $l = 2$ м та перерізом $S = 0,5$ мм², розрахуємо опір жили. Для міді питомий опір ρ_{Cu} становить $0,0175$ Ом · мм²/м, звідси опір жили:

$$R_{\text{жили}} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l}{S} = \frac{0,0175 \cdot 2}{0,5} = 0,07 \text{ Ом} \quad (3.10)$$

У двопровідній схемі сигнал проходить по двох жилах, тому сумарний додатковий опір лінії:

$$R_{\text{пров}} = 2R_{\text{жили}} = 2 \cdot 0,07 \text{ Ом} \quad (3.11)$$

Переведемо в температуру використавши відношення приросту опору до приросту температури (3.7):

$$\Delta t_{\text{пров}} = \frac{R_{\text{пров}}}{dT/dR} = \frac{0,14}{3,85} \approx 0,036 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.12)$$

Таким чином, опір двометрового мідного кабелю перерізом $0,5$ мм² еквівалентний систематичній похибці вимірювання температури приблизно $0,04$ °C. Якщо інтерпретувати цю величину як межу можливої похибки і припустити рівномірний закон розподілу в межах $\pm \Delta t$, стандартна невизначеність складової, пов'язаної з опором з'єднувальних проводів, дорівнює:

$$u_{\text{пров}} = \frac{\Delta t_{\text{пров}}}{\sqrt{3}} \approx \frac{0,036}{\sqrt{3}} \approx 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.13)$$

Отримане значення на порядок менше за похибку самого вимірювального тракту ПР102 та за похибку первинного перетворювача Pt1000. Отже, при застосуванні мідного кабелю довжиною близько 2 м з перерізом $0,5$ мм² внесок опору з'єднувальних проводів у сумарну невизначеність каналу вимірювання температури можна вважати малозначущим порівняно з іншими складовими, хоча формально він

включений у загальний баланс похибок.

Припускаючи статистичну незалежність усіх складових, комбіновану стандартну невизначеність каналу отримуємо за коренем квадратним із суми квадратів окремих складових:

$$u_c = \sqrt{u_{\text{датч}}^2 + u_{\text{вх}}^2 + u_{\text{пров}}^2} = \sqrt{0,26^2 + 1,67^2 + 0,02^2} = 1,69 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.14)$$

Розширена невизначеність при $k = 2$:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 1,69^\circ\text{C} = 3,38^\circ\text{C} \quad (3.15)$$

Отже, для робочої точки близько 30°C сумарна очікувана похибка вимірювального каналу «Pt1000 + ПР102» не перевищує $\pm 1,69^\circ\text{C}$. Найбільший вклад у цей показник вносить похибка входу ПР102. Для зменшення цього впливу необхідно розглянути інші варіанти підключення датчика, наприклад із застосування схеми-посередника з більш точним АЦП, або розглянути інші варіанти датчиків, наприклад інтегровані рішення що включають точну схему для вимірювання та передають дані по цифровому інтерфейсу.

3.8 Обчислення невизначеності вимірювального каналу вологості

Вимірювальний канал відносної вологості реалізовано на базі промислового перетворювача E+E EE210 з уніфікованим аналоговим виходом 4–20 мА та універсального аналогового входу типу «ДАТ» програмованого реле ОВЕН ПР102 у режимі роботи 1 (вимірювання струму 4–20 мА). Діапазон вимірювання приймаємо 0...100 %RH, розрахунок ведемо для робочої точки RH = 80 %.

За лінійного масштабування 4–20 мА на 0...100 %RH струм у робочій точці:

$$I = 4\text{мА} + 16\text{мА} \cdot \frac{RH}{100} = 4 + 16 \cdot 0,8 = 16,8\text{мА}. \quad (3.16)$$

Для оцінювання похибки (невизначеності) каналу виділимо основні складові: похибка первинного перетворювача (EE210), похибка аналогового входу ПР102 у режимі 1, а також вплив з'єднувальних проводів.

Для оцінювання похибки (невизначеності) каналу виділимо основні складові: похибка первинного перетворювача (ЕЕ210), похибка аналогового входу ПР102 у режимі 1, а також вплив з'єднувальних проводів.

Похибка датчика ЕЕ210. Для виконання ТЗ у паспорті наведено межу похибки вимірювання відносної вологості $\pm 2,5\% RH$ (за номінальних умов). Прийmemo цю величину як граничну абсолютну похибку:

$$\Delta RH_{\text{сенс}} = \pm 2,5\% RH \quad (3.17)$$

За рівномірного закону розподілу стандартна невизначеність складової:

$$u(RH_{\text{сенс}}) = \frac{\Delta RH_{\text{сенс}}}{\sqrt{3}} = \frac{2,5}{\sqrt{3}} \approx 1,44\% RH \quad (3.18)$$

Похибка аналогового входу ПР102. Для режиму роботи 1 (0–10 В або 4–20 мА) межа основної зведеної похибки універсального аналогового входу типу «ДАТ» становить не більше $\pm 0,5\%$. Оскільки вхід масштабується на діапазон 0...100 %RH, еквівалентна гранична похибка у вимірюваній величині дорівнює:

$$\Delta RH_{\text{ПР102}} = \pm 0,5\% \cdot (100 - 0) = \pm 0,5\% RH. \quad (3.19)$$

Тоді стандартна невизначеність:

$$u(RH_{\text{ПР102}}) = \frac{\Delta RH_{\text{ПР102}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} \approx 0,289\% RH. \quad (3.20)$$

Вплив з'єднувальних проводів. Для з'єднання приймаємо той самий кабель, що і в каналі температури: довжина близько 2 м, мідні жили перерізом 0,5 мм². Для вимірювання струму 4–20 мА в ПР102 використовується вбудований шунт 121 Ом. Опір мідної лінії довжиною 2 м (переріз 0,5 мм²) становить приблизно 0,14 Ом, що при струмі 20 мА дає падіння напруги близько 2,8 мВ. За умови забезпечення достатньої напруги живлення петлі вплив опору проводів на значення вимірюваного струму відсутній і ним можна знехтувати.

Припускаючи статистичну незалежність складових, комбіновану стандартну невизначеність визначимо як корінь квадратний із суми квадратів:

$$u_c(RH) = \sqrt{(u(RH_{\text{сенс}})^2 + u(RH_{\text{ПР102}})^2)} = \\ = \sqrt{(1,44^2 + 0,289^2)} \approx 1,47\% RH. \quad (3.21)$$

Розширена невизначеність при $k = 2$:

$$U(RH) = k \cdot u_c(RH) = 2 \cdot 1,47\% RH = 2,94\% RH \quad (3.22)$$

Таким чином, у робочій точці $RH = 80\%$ канал забезпечує комбіновану стандартну невизначеність близько $1,5\% RH$, а розширену ($k = 2$) близько $3\% RH$, що є достатнім для задач моніторингу та керування мікрокліматом у приміщенні з кажанами.

3.9 Обчислення невизначеності вимірювального каналу освітленості

Вимірювальний канал освітленості побудований на датчику PHOTASGARD АНКФ з активним аналоговим виходом 4–20 мА та універсальному аналоговому вході типу «ДАТ» ПР102 у режимі 1. Датчик налаштовано на діапазон 0...500 лк, що відповідає очікуваним рівням освітленості у приміщенні. Розрахунок ведемо для робочої точки $E = 100$ лк.

За лінійного масштабування 4–20 мА на 0...500 лк струм у робочій точці:

$$I = 4\text{мА} + 16\text{мА} \cdot \frac{E}{500} = 4 + 16 \cdot 0,2 = 7,2\text{мА}. \quad (3.23)$$

Як і для попереднього каналу, розглянемо похибку датчика, похибку входу ПР102 і вплив проводів.

Похибка датчика PHOTASGARD АНКФ. У паспорті вказано похибку вимірювання менш як 5% від кінцевого значення, тобто від верхньої межі вибраного діапазону. Для діапазону 0...500 лк маємо:

$$\Delta E_{\text{сенс}} = \pm 0,05 \cdot 500 = \pm 25 \text{ лк}. \quad (3.24)$$

Стандартна невизначеність за рівномірного закону розподілу:

$$u(E_{\text{сенс}}) = \frac{\Delta E_{\text{сенс}}}{\sqrt{3}} = \frac{25}{\sqrt{3}} \approx 14,43 \text{ лк}. \quad (3.25)$$

Похибка аналогового входу ПР102. Для режиму 1 межа основної

зведеної похибки входу становить $\pm 0,5 \%$. Для діапазону $0 \dots 500$ лк еквівалентна гранична похибка:

$$\Delta E_{\text{ПР102}} = \pm 0,5\% \cdot 500 = \pm 2,5 \text{ лк.} \quad (3.26)$$

Стандартна невизначеність:

$$u(E_{\text{ПР102}}) = \frac{\Delta E_{\text{ПР102}}}{\sqrt{3}} = \frac{2,5}{\sqrt{3}} \approx 1,44 \text{ лк.} \quad (3.27)$$

Вплив з'єднувальних проводів. Для струмового сигналу $4\text{--}20$ мА опір з'єднувальних проводів (2 м, $0,5$ мм²) визначає додаткове падіння напруги у колі, але не змінює величину струму, що вимірюється входом, за умови забезпечення достатньої напруги живлення датчика. Тому внесок цієї складової в похибку вимірювання освітленості приймаємо малозначущим.

Комбінована стандартна невизначеність каналу. За незалежності складових:

$$\begin{aligned} u_c(E) &= \sqrt{(u(E_{\text{сенс}})^2 + u(E_{\text{ПР102}})^2)} = \\ &= \sqrt{(14,43^2 + 1,44^2)} \approx 14,50 \text{ лк} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Розширена невизначеність при $k = 2$:

$$U(E) = k \cdot u_c(E) \approx 2 \cdot 14,50 = 29,0 \text{ лк.} \quad (3.29)$$

Отже, для робочої точки $E = 100$ лк комбінована стандартна невизначеність вимірювального каналу становить близько $14,5$ лк, а розширена ($k = 2$) близько 29 лк. Домінуючою складовою є похибка первинного перетворювача, що узгоджується з його паспортною точністю «до 5% від верхньої межі діапазону».

Висновки до розділу 3

Реалізація програмної частини в середовищі AQLogic підтвердила, що обрані датчики та інтерфейси можуть бути зведені в цілісну систему

вимірювання і керування з опитуванням каналів, обробленням даних і формуванням керувальних дій; додатково аналітична модель використовується як інструмент контролю узгодженості температурних вимірювань і раннього виявлення небажаних відхилень.

Оцінювання невизначеностей показує, що для вимірювального каналу температури розширена невизначеність при $k=2$ не перевищує $\pm 3,38$ °C, причому домінуючим чинником є похибка аналогового входу ПР102, а отже подальше підвищення точності раціонально пов'язувати саме зі зміною схеми вимірювання або переходом на точніші вузли перетворення.

Для каналів вологості та освітленості розширена невизначеність при $k=2$ є прийнятною та складає 2,94% та 29 лк відповідно, що є допустимим для спроектованої системи.

Сукупно отримані показники точності (зокрема для вологості та освітленості у робочих точках) і працездатність алгоритмів підтверджують достатність запропонованих технічних та програмних рішень для задач безперервного моніторингу й автоматизованого підтримання мікроклімату.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «TERRABAT»

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

TerraBat – це стартап-проект, спрямований на створення автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для моніторингу та підтримки параметрів мікроклімату у інсталяційних приміщеннях, де утримуються нільські крилани (*Rousettus aegyptiacus*). Актуальність проекту зумовлена високою чутливістю цих рукокрилих до коливань навколишнього середовища: навіть незначні відхилення температури чи вологості від оптимальних значень можуть призвести до фізіологічного стресу, зниження імунітету та порушення поведінки тварин. Забезпечення стабільного контрольованого мікроклімату є ключовим фактором добробуту і здоров'я криланів, тому сучасним підходом є впровадження автоматизованих ІВС, що здатні відтворювати динамічні параметри середовища, наближені до природних умов існування виду.

Основна ідея TerraBat – розробити комплекс, який у реальному часі вимірює критичні параметри середовища (температура, вологість, освітленість, склад повітря, швидкість вентиляції) та автоматично керує обладнанням підтримки клімату (обігрівачі, зволожувачі, вентилятори, освітлення тощо) для підтримання оптимальних умов. Система базується на промисловому програмованому логічному контролері ПЛК «Овен» ПЛК100, що володіє необхідною надійністю та гнучкістю конфігурації для цілодобової роботи. В якості датчиків використано прецизійні платинові термоперетворювачі опору Pt1000 для температури та ємнісні датчики для відносної вологості – такий вибір обумовлений високою точністю, стабільністю і сумісністю з обраним контролером. Передбачено сенсори рівня освітлення (наприклад, фотометричний датчик PHOTASGARD AHKF) та при необхідності газові датчики (CO_2 , NH_3) для контролю якості повітря, а також

керовані приводи вентиляції. У сукупності ці рішення дозволяють створити гнучку систему моніторингу і керування мікрокліматом, здатну забезпечити нільським криланам комфортні умови, наближені до природного середовища їх існування.

У таблиці 4.1 представлено узагальнений зміст ідеї TerraBat, потенційні напрями її застосування та ключові вигоди для користувачів.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї (продукт/рішення)	Напрями застосування	Вигоди для користувача
Автоматизована система моніторингу та керування мікрокліматом у приміщеннях для нільських криланів.	Підтримка оптимального середовища у закритих експозиціях з тропічними видами рукокрилих у зоопарках.	Гарантує здоров'я і комфорт тварин (мінімізує стрес і хвороби).
		Автоматизує рутинні процеси догляду, знижує навантаження на персонал.
		Імітує природні умови (цикл день/ніч, сезонні коливання), що покращує добробуту тварин.

Ідея стартапу має чітко визначену цінність – забезпечення оптимального мікроклімату для нільських криланів та споріднених видів у неволі. Основні потенційні ринки – це українські зоопарки та зоокутки, де є потреба покращити умови утримання тварин, а також любителі екзотичних тварин, які прагнуть утримувати нетипових улюбленців у домашніх умовах. Продукт відрізняється від існуючих аналогів комплексністю та спеціалізацією: на відміну від стандартних терморегуляторів чи гігростатів для тераріумів, TerraBat контролює увесь спектр параметрів і адаптований під специфічні потреби тропічних рукокрилих. Таким чином, сформовано цілісний образ ідеї та базові ринкові ніші, де вона може бути реалізована.

У таблиці 4.2 перелічено обрані техніко-економічні показники та

приведено їх значення для: проєкту TerraBat, продуктів-конкурентів. На основі співставлення визначено, які характеристики є сильними (S), нейтральними (N) чи слабкими (W) сторонами нашої ідеї відносно конкурентів.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Показник (характеристика)	(потенційні) товари/концепції конкурентів				Оцінка для TerraBat (W/N/S)
		TerraBat (наш проєкт)	Zoo Med ECC (аналог)	Прості Т/Н-регулятори	Саморобні системи (ПЛК/DIY)	
1	Кількість контрольованих параметрів (температура, вологість, освітлення, вентиляція, газ)	5+ параметрів (комплексний контроль всіх ключових факторів середовища).	2 параметри (тільки температура і вологість).	1–2 параметри (зазвичай лише Т або Т+Н).	3–5 параметрів (залежить від навичок розробника, часто немає газового аналізу).	S
2	Точність та якість сенсорів	Промислові датчики: Pt1000 ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$), вологість $\pm 2\text{--}3\%$, проф. освітленість тощо.	Напівпрофесійні датчики, похибка $\sim \pm 1^{\circ}\text{C}$, вологість $\pm 5\%$.	Побутовий рівень, похибка висока ($\geq \pm 1^{\circ}\text{C}$).	Варіює: можуть використовувати якісні датчики, але часто без калібровки.	S
3	Надійність та режим роботи	Цілодобова робота 24/7 на основі промислового ПЛК (MTBF > 100 000 год).	Орієнтовано на побутове використання, обмежена гарантія 1 рік.	Побутові пристрої, не розраховані на безперервну роботу роками.	Залежить від компонування; можливі збої через саморобність, відсутня офіційна підтримка.	S.
4	Автоматизація та інтелект	Гнучке сценарне керування	Програмовані режими (день/ніч),	Примітивне керування по	Залежить від реалізації: можливі	S/N

		(добові цикли, адаптивний алгоритм підтримки градієнта температур).	прості порогові алгоритми.	порогу (On/Off).	складні алгоритми, але потребує програмування.	
5	Взаємодія та моніторинг (UI, комунікації)	Мережева інтеграція: інтерфейси RS-485/Ethernet, можливість підключення НМІ-панелі, віддалений моніторинг через ПК.	LCD-пульт, обмежена віддалена взаємодія (дротовий пульт)	Мінімальний інтерфейс (цифровий дисплей, кнопки).	Може бути веб-інтерфейс чи інше (залежить від навичок автора).	S
6	Ціна рішення (орієнтовно)	Висока: ~60–70 тис. грн за комплект (якісні компоненти, PLC, монтаж).	Середня: ~10–12 тис. грн (закордонний комплект).	Низька: ~2–4 тис. грн (масові пристрої).	Різна: від 8 тис. грн (комплектуючі) + час на розробку.	W
7	Простота використання	Потребує початкового налаштування фахівцем; подальше керування через зручну панель, є система сповіщень.	Plug-and-play установка, проста настройка з пульта.	Дуже проста (розраховано на непідготовленого користувача).	Складність залежить від реалізації, як правило користувачу важко втрутитись.	W

У цьому аналізі сильними сторонами проєкту TerraBat є його технічні переваги: система контролює повніший набір параметрів мікроклімату та

використовує більш точні сенсори, ніж існуючі тераріумні контролери. Також TerraBat побудовано на промисловому контролері – це забезпечує високу надійність і можливість роботи 24/7 без перерв, що критично для систем життєзабезпечення тварин.

Слабкі сторони (W) пов’язані насамперед з витратами та складністю: собівартість TerraBat вища за прості масові прилади, оскільки включає дорогі промислові компоненти і вимагає інженерної праці для налаштування. Це звужує коло потенційних клієнтів, адже не всі будуть готові платити більше за «преміальне» рішення. Крім того, система потребує професійного монтажу та налаштування: для кінцевого користувача вона менш «plug-and-play», ніж прості терморегулятори, і це може відлякувати частину приватних власників.

В цілому, за більшістю ключових характеристик TerraBat не поступається конкурентам, а в багатьох аспектах – перевершує їх (ширший функціонал, точність, надійність, гнучкість). Це формує основу конкурентних переваг проєкту. Натомість ідентифіковані недоліки вказують на сфери, що потребують уваги: зниження вартості (або обґрунтування преміальної ціни через цінність) та спрощення користувацького досвіду (розробка зручного інтерфейсу, інструкцій, сервісної підтримки). Виділені сильні та слабкі сторони далі будуть використані при формуванні стратегії розвитку, позиціонування та SWOT-аналізу стартапу.

У таблиці 4.3 наведено аналіз технологічної здійсненності ідей проєкту

№	Ідея проєкту	Технологічний компонент для реалізації ідеї	Наявність технології на ринку	Доступність технології для авторів проєкту
1	Створення автоматизованої ІВС мікроклімату	Програмований логічний контролер (ПЛК) як ядро системи керування (використання ПЛК	Готові ПЛК широкодоступні на ринку (українські та зарубіжні виробники). Дана технологія зріла і	Команда має компетенції у програмуванні CODESYS для ПЛК; обладнання ПЛК100 надане

	для експозицій з кажанами	«Акутек» ПЛК100 або аналогів).	широко застосовується.	кафедрою для досліджень, можна придбати у виробника.
		Датчики температури, вологості, освітленості, газу з інтерфейсом для підключення до ПЛК; технологія вимірювання цих величин.	На ринку наявні промислові датчики: Pt1000, SHTxx, фотодатчики освітленості 4–20 мА, сенсори CO ₂ тощо. Не потребує розробки нового сенсора – достатньо обрати з існуючих моделей.	Автор має досвід відбору та калібрування датчиків. Постачальники в Україні можуть забезпечити необхідні сенсори.
		Алгоритми керування та ПЗ моніторингу: програмне забезпечення для реалізації логіки контролю мікроклімату, інтерфейс оператора (HMI або ПК).	Можна реалізувати на основі стандартного ПЗ для ПЛК (CODESYS для алгоритмів, SCADA/HMI для інтерфейсу). Доступні фреймворки, не треба «вигадувати велосипед».	Програмування ПЛК у середовищі CODESYS – компетенція команди (підтверджено під час досліджень).
		Виготовлення корпусу, монтаж: технологія збірки системи у готовий блок (монтаж обладнання у шафі, проводка датчиків, захист від вологи).	Типові рішення – монтаж у стандартний електротехнічний шкаф, використання DIN-рейкових компонентів. Корпуси й шафи доступні, технологія складання знайома електрикам.	Автори можуть виконати макетний монтаж самостійно; для серійного виробництва можна залучити підрядників. Ніяких унікальних виробничих процесів не потрібно.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

На основі визначених вище характеристик і переваг продукту перейдемо до аналізу ринкового середовища для стартап-проекту TerraBat. Мета цього етапу – оцінити потенційний ринок, попит і конкурентне середовище в

Україні, виокремити цільові групи клієнтів, а також виявити зовнішні фактори, що можуть сприяти або загрожувати успішній реалізації проєкту.

Продукт TerraBat знаходиться на стику двох сфер – автоматизація (ІТ в аграрно-зоотехнічній галузі) та ринок зоотоварів для утримання тварин. В Україні цей ринок доволі вузький: утримання кажанів у неволі – рідкісна практика, основними споживачами потенційно є кілька зоопарків та одиничні приватні ентузіасти. Водночас на глобальному рівні простежується тенденція до впровадження технологій для поліпшення добробуту тварин у неволі.

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика (оцінка)
1	Кількість головних гравців, од.	3
2	Загальний обсяг продаж, млн.грн/рік	123137,4
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
4	Наявність обмежень для входу (бар'єри)	фінансовий бар'єр: вузький ринок означає складність покриття витрат, потрібні інвестиції з довгим горизонтом окупності. По-третє, регуляторні вимоги: необхідність сертифікації обладнання (безпека, електромагнітна сумісність) може ускладнити запуск продукту.
		бар'єри довіри: зоопарки обережно ставляться до нових невипробуваних рішень, потрібні рекомендації, пілотні проєкти для завоювання репутації.
		регуляторні вимоги: необхідність сертифікації обладнання (безпека, електромагнітна сумісність) може ускладнити запуск продукту.
5	Специфічні вимоги до стандартизації/сертифікації	Присутні. Обладнання, що працює в зоопарках або продається приватним споживачам, має відповідати технічним регламентам України. Потрібна сертифікація електробезпеки, можливо, санітарно-гігієнічні висновки (оскільки пристрій експлуатується у присутності тварин і людей). Для виходу на ринок ЄС – обов'язковий знак CE.
6.	Середня норма рентабельності в галузі, %	5.7%

Попередній аналіз показує, що ринок TerraBat – вузький та спеціалізований, проте поступово зростає і не є насиченим конкурентами. Це скоріше нішевий сегмент у загальному ринку автоматизації та зоотоварів. З одного боку, невелика кількість гравців і низька конкуренція створюють можливість зайняти лідерську позицію у своїй ніші. З іншого боку, скромні обсяги потенційних продаж ставлять під сумнів швидку окупність – проект орієнтований на довгострокову стратегію, з розрахунком на розширення ринку (наприклад, за рахунок інших видів або виходу на закордонні зоопарки). Входження на ринок не заблоковане непереборними бар'єрами: основні виклики – фінансові (забезпечити інвестиції та витримати невеликі продажі на старті) та маркетингові (здобути довіру перших клієнтів через якість і сертифікацію). Загалом, за попередньою оцінкою, ринок хоча й невеликий, але привабливий для входу у формі спеціалізованого стартапу, оскільки конкурентне поле майже вільне, а тренд на підвищення стандартів утримання тварин грає на користь появи таких продуктів.

В таблиці 4.5 наведено детальну характеристику потенційних клієнтів стартап-проекту.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує попит	Цільова аудиторія (сегменти клієнтів)	Відмінності у поведінці та факторах вибору	Вимоги споживачів до товару
1	Забезпечити здоров'я та комфорт тварин у неволі на рівні сучасних стандартів (покращення умов утримання).	Зоопарки, екзотаріуми. В Україні це 5–7 установ, де можуть утримуватися тропічні види (Київський, Харківський, Миколаївський	Рішення про закупівлю приймається колегіально (керівництво зоопарку, головний ветлікар). Враховуються довгострокові	До продукту: висока надійність, точність, сумісність зі стаціонарним обладнанням (HVAC системами), можливість масштабування на великі вольєри; відповідність

		зоопарки, приватні екзотаріуми тощо).	вигоди (здоров'я колекції, репутація зоопарку). Існують бюрократичні процедури держзакупівель. Вимогливі до сертифікації, надійності, прагнуть мінімізувати ризику для тварин.	стандартам безпеки, гарантія безперебійної роботи. До постачальника: досвід роботи з зоологічними установами, наявність рекомендацій, сервісне обслуговування (оперативний ремонт/налаштування), навчання персоналу.
2	Полегшити догляд за екзотичним вихованцем, уникнути його загибелі чи хвороб через невідповідний мікроклімат.	Приватні власники нільських криланів або подібних тварин. Невелика група ентузіастів (можливо 10–20 осіб по країні), які утримують або планують утримувати фруктових кажанів, дрібних криланів.	Ці клієнти активно шукають інформацію в інтернеті, спілкуються на форумах. Вибираючи обладнання, керуються відгуками, порадами інших власників, співвідношенням ціни і якості. Більш чутливі до ціни; можуть імпортувати девайси самостійно. Важливі гарантії, але схильні до DIY-рішень заради економії.	До продукту: простота установки і використання, зрозумілий інтерфейс (бажано мобільний додаток), безпечність для тварини (відсутність шкідливих матеріалів, тихий режим роботи), доступна ціна та енергоефективність. До постачальника: надання інструкцій українською, консультації по утриманню, можливість доставки по країні, гарантійні зобов'язання хоча б 1–2 роки.
3	Здобути нові наукові дані про вплив параметрів середовища на тварин, експериментально	Дослідницькі установи, університетські лабораторії біологічного профілю, що	Обмежений бюджет, проекти фінансуються грантами. Рішення купити приймають	До продукту: наявність функцій запису даних (data logging), гнучкість налаштувань (експериментальні режими), можливість

	моделювати кліматичні умови.	працюють з рукокрилими (наприклад, Інститут зоології НАН, веткафедри).	науковці, вони технічно грамотні й критичні до характеристик. Цінують можливість отримувати точні дані для досліджень (потрібен експорт даних). Можуть співпрацювати у вигляді випробувань прототипів.	інтеграції з ПК для аналізу. До постачальника: готовність модифікувати систему під запити експерименту, технічна підтримка в процесі установки, документованість (технічний опис для посилань у публікаціях).
--	------------------------------	--	--	--

Цільовий ринок TerraBat чітко сегментований на B2B та B2C сегменти, які висувають різні вимоги. Основний сегмент – зоопарки, адже саме там зосереджена найбільша потреба у подібних системах і є ресурси для їх впровадження. Ці клієнти прагнуть підвищити якість утримання тварин і потребують надійного професійного рішення. Вони очікують від продукту гарантії стабільності, точності, відповідності стандартам, а від постачальника – компетентності і підтримки. Другий сегмент – приватні власники – ставить інші пріоритети: їм важлива простота і доступність, оскільки вони не мають інженерного штату. Для них TerraBat має бути максимально дружнім і, за можливості, недорогим. Окремо можна виділити і невеликий науковий сегмент, чії потреби перетинаються із зоопарками та додають вимогу гнучкості для дослідів. З огляду на обмежені ресурси стартапу, на старті доцільно зосередитися на сегменті зоопарків як на пріоритетному: він менш чутливий до ціни і забезпечить вагомі референсні впровадження. Вихід на приватний ринок можливий на другому етапі – після успішних кейсів, можна буде запропонувати спрощену, дешевшу версію для ентузіастів.

У таблиці 4.6 наведено фактори загроз для стартап-проекту.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз.

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Економічна криза, спад доходів	Погіршення економічної ситуації (війна, криза) призводить до урізання бюджетів зоопарків і зменшення витрат на інновації. Попит може впасти.	Диверсифікація ринків та продуктів. Активніше просувати продукт на закордонні ринки або запропонувати бюджетну модифікацію TerraBat Lite.
2	Поява сильного конкурента	На ринок зайде велика зарубіжна компанія з аналогічним рішенням, або локальний системний інтегратор створить свою версію.	Стратегія випередження та USP. Швидко наростити клієнтську базу, щоб утримати частку ринку лояльними користувачами. Відбудовуватися за рахунок локального сервісу, гнучкого налаштування під клієнта (те, чого великі бренди не роблять). Постійно впроваджувати інновації, щоб конкуренти наздоганяли нас, а не навпаки.
3	Зміна вподобань або трендів	Якщо зменшиться інтерес до екзотичних тварин серед публіки, зоопарки можуть скоротити експозиції тропічних видів (наприклад, через зміну фокусу на локальну фауну). Нішевий попит може ще більше звужитися.	Перенацілювання. Бути готовими адаптувати продукт для інших тварин або суміжних галузей (наприклад, тераріуми для рептилій, інкубатори для птахів тощо). Фактично розширити застосування технології, щоб не залежати від одного виду.
4	Регуляторні перепони, сертифікація (юридичний фактор)	Ускладнення/подорожчання процедур сертифікації електронного обладнання, технічних регламентів. Можливі нові правила імпорту компонентів (митні тарифи) або вимоги екологічності, що треба виконувати.	Активний менеджмент якості та відповідності. Закласти у бізнес-план витрати на сертифікацію. Отримати необхідні сертифікати (УкрСЕПРО/Техрегламент, CE) якомога раніше, щоб потім цей бар'єр був пройденим. Відстежувати зміни законодавства, брати участь у професійних асоціаціях, щоби мати голос у регуляторній дискусії.
5	Залежність від постачання електроенергії	Постійні відключення електрики або стрибки напруги (актуально в Україні) можуть	Вбудувати автономність. Постачати TerraBat разом з джерелом безперебійного

		вивести з ладу систему або зробити її ненадійною, що недопустимо для життєзабезпечення тварин.	живлення (UPS) і захистом від перенапруг. Проектувати систему з резервними режимами (наприклад, при відключенні – автоматично відкривати вентиляцію, щоб уникнути перегріву). Це підвищить довіру клієнтів в умовах енергетичних ризиків.
--	--	--	---

Що стосується загроз, то найбільш серйозні – це макроекономічні та конкурентні. Економічна нестабільність в країні прямо впливає на бюджети потенційних клієнтів, тому стартап повинен мати «запас міцності» (фінансову подушку або адаптивний бізнес-план) на випадок падіння продажів. Поява сильного конкурента могла б швидко витіснити нас, тож потрібно завчасно формувати лояльність клієнтів і технологічну перевагу. Деякі загрози можна перетворити на можливості – наприклад, ризик звуження ніші компенсується готовністю масштабуватися на інші сегменти. Регуляторні та технічні ризики хоча й додають складнощів, але цілком керовані проактивними діями. Отже, розуміння зовнішніх факторів дозволяє планувати стратегічні кроки, щоби максимально використати можливості й пом'якшити вплив загроз.

У таблиці 4.7 наведено фактори можливостей для стартап-проекту.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Підвищення стандартів утримання тварин	Державні та міжнародні стандарти стають жорсткішими, зоопарки зобов'язані покращувати умови утримання (температурні режими, облік благополуччя).	Просувати продукт як інструмент для відповідності новим стандартам. Брати участь у профільних конференціях, демонструючи, як наша система забезпечує виконання вимог законодавства та рекомендацій EAZA.
2	Ріст інтересу до технологій в зоопарках	Зростає готовність керівників зоопарків впроваджувати ІТ-рішення.	Налагодити партнерства з ІТ-компаніями, що автоматизують зоопарки (напр., системи обліку, білетні системи), щоби інтегрувати нашу систему в їх пропозиції.

3	Нові технології здешевлюють компоненти	З'являються дешевші сенсори і контролери без значної втрати якості. Це може знизити собівартість нашого продукту.	Перегляд компонентної бази для оптимізації цін. У разі появи нових доступних сенсорів (IoT-модулів, бездротових датчиків) – інтегрувати їх замість дорожчих аналогів, зменшуючи ціну кінцевого рішення.
4	Гранти та програми підтримки інновацій	Існують програми (державні, міжнародні) фінансування стартапів у сфері екології, охорони природи, зоології. Можна отримати грант на впровадження технологій для благополуччя тварин.	Залучити грантове фінансування. Подаватися на програми (наприклад, Український фонд стартапів, Horizon Europe по темі welfare animals). Отримані кошти направити на R&D і пілотні проекти в зоопарках, що також додасть престижу стартапу.
5	Відсутність прямих конкурентів у ніші	На локальному ринку немає компаній, що пропонують аналогічний комплексний продукт. Єдиний конкурент – імпорт, але він не адаптований під специфічні потреби криланів.	Захопити першим цю нішу. Агресивна маркетингова стратегія «першого гравця»: швидко встановити пілотні системи в ключових зоопарках, закріпити за TerraBat імідж синоніму рішення для клімату у експозиціях. Використати час до появи конкурентів для формування довгострокових контрактів і сервісної бази.

Розглянуті можливості дають TerraBat шанси для прискореного розвитку. Зокрема, тенденція до підвищення стандартів утримання тварин означає, що продукт потрапляє «в тренд» і може стати затребуваним інструментом для зоопарків, які прагнуть відповідати найкращим практикам. Відсутність прямих конкурентів відкриває шлях для швидкого завоювання ніші – це «вікно можливостей» треба використати, поки ринок вільний. Також сприятливим є факт потенційного здешевлення технологій: стартап зможе зменшити витрати з часом, підвищуючи рентабельність або роблячи продукт доступнішим для ширшої аудиторії. Варто відзначити і можливість залучити зовнішню підтримку (гранти), що може суттєво знизити фінансовий тиск на проект у початковій фазі.

У таблиці 4.8 наведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Характеристика	В чому проявляється	Вплив на діяльність
Тип конкуренції	Монополістична конкуренція; кілька брендів із різним рівнем функціоналу.	Потрібна чітка диференціація та унікальна цінність продукту.
Рівень боротьби	Конкуренція здебільшого міжнародна.	Акцент на якості, локальній підтримці та нижчих витратах постачання.
Галузевість конкуренції	Переважно внутрішньогалузева, частково міжгалузева (HVAC, універсальні контролери).	Перевага через спеціалізацію та адаптацію під тварин.
Види конкуренції	Родова: різні способи підтримки мікроклімату; Видова: інші термостати/гігростати.	Потрібно демонструвати комплексність та ефективність проти окремих дешевих рішень.
Характер переваг	Нецінова (функції, надійність).	Основна ставка – інновації, не конкуренція ціною.
Інтенсивність конкуренції	Марочна: домінують відомі бренди.	Потрібно формувати довіру до нового українського бренду.

Ринок рішень для контролю мікроклімату в інсталяційних приміщеннях перебуває у стані монополістичної конкуренції: існує кілька сильних міжнародних виробників, але жоден із них не займає домінуючого положення. За таких умов TerraBat може успішно працювати лише за умови чіткої диференціації та підкреслення власної спеціалізації, оскільки споживачі орієнтуються не стільки на ціну, скільки на функціональність, надійність та репутацію бренду. Наявність альтернативних способів підтримання клімату робить середовище конкурентним, хоча повноцінних аналогів TerraBat в Україні наразі немає. Тому здатність виділити унікальні можливості та підкреслити практичну користь системи стає визначальною для зміцнення позицій на ринку.

У таблиці 4.9 наведено аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Замінники
Складові аналізу	Zoo Med, Eho Terra, Inkbird, DIY-системи; немає прямого аналога у ніші кажанів.	Бар'єри входу невисокі; можливі копії або вихід міжнародних брендів.	Висока замінність компонентів; низька ринкова влада.	Невелика кількість зоопарків; приватні покупці чутливі до ціни.	Ручний контроль, набір окремих приладів, HVAC-системи.
Висновки	Наразі конкуренція помірна, але важливо підкреслювати спеціалізацію.	Потрібно швидко закріпити позиції та створити унікальний бренд.	Низькі ризики, можливість контролювати собівартість.	Потрібно пропонувати хороше співвідношення ціни/цінності та якісну підтримку.	Висока загроза: необхідно показувати переваги автоматизації.

Аналіз за моделлю М. Портера свідчить, що пряма конкуренція поки що не є гострою, адже TerraBat фактично стане першим повноцінним комплексним рішенням у своїй ніші. Проте загальний конкурентний тиск формується насамперед за рахунок замінників, оскільки багато потенційних користувачів здатні обійтися дешевшими або більш звичними способами регулювання мікроклімату. Технічні бар'єри входу на ринок не є високими, тому успішна поява TerraBat може швидко стимулювати появу нових гравців. Покупці мають помітну ринкову силу, особливо в частині ціноутворення та вимог до сервісу, тоді як постачальники не створюють значних ризиків. Загальна ситуація вимагає від проєкту швидкого формування власної ціннісної пропозиції та чіткого демонстрування переваг автоматизації перед традиційними рішеннями, щоб закріпити ринкову позицію до того, як конкуренція стане інтенсивнішою.

У таблиці 4.10 наведено обґрунтування факторів

конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор	Обґрунтування
1	Точність вимірювань	Прецизійні сенсори забезпечують точніший контроль порівняно з масовими приладами.
2	Адаптивність для різних видів тварин	Можливість налаштувати діапазони та режими під будь-який вид.
3	Автономність та автоматизація	Повна автоматизація 24/7 та складні сценарії управління.
4	Ціна	TerraBat дорожчий за масові аналоги.
5	Простота використання	Потребує професійного налаштування.
6	Українське виробництво і підтримка	Локальний сервіс, відсутність митних витрат, швидка кастомізація.

Аналіз ключових факторів конкурентоспроможності показує, що сила TerraBat полягає у технічній перевазі та здатності забезпечувати точніший, гнучкіший і стабільніший контроль умов порівняно з типовими ринковими продуктами. Ця технологічна перевага робить систему привабливою передусім для професійних користувачів, яким важлива надійність та автономність роботи. Водночас висока ціна та складність встановлення створюють певні бар'єри для ширшого кола покупців, що природно звужує ринок і підвищує вимоги до обґрунтування цінності продукту. Локальне виробництво і можливість оперативної технічної підтримки частково компенсують ці недоліки. Загалом конкурентоспроможність TerraBat залежить від здатності підтримувати технологічні переваги та водночас поступово зменшувати бар'єри для користувача, роблячи систему доступнішою і простішою у впровадженні.

У таблиці 4.11 наведено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «TerraBat».

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «TerraBat»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «TerraBat»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Точність вимірювання	18	+						
2	Адаптованість під різні види тварин/вольєри	0						+	
3	Автономність та автоматизація підтримки клімату	20	+						
4	Вартість придбання та впровадження	15							+
5	Простота інтеграції та використання	12						+	
6	Локальне (українське) виробництво	8	+						

В результаті аналізу видно, що TerraBat має виражені сильні сторони: технологічну перевагу в точності контролю та широті функцій, високу надійність і автоматизацію роботи, а також унікальність як локальний спеціалізований продукт. Ці фактори дозволяють йому перевершувати наявні аналоги за якістю підтримки мікроклімату. З іншого боку, слабкими сторонами проекту наразі є висока собівартість і складність впровадження, що обмежує коло потенційних клієнтів. Отже, стратегія TerraBat має базуватися на максимальному використанні своїх сильних сторін (якісна диференціація) та мінімізації впливу слабких (зниження вартості, спрощення користування) – це забезпечить конкурентоспроможність стартапу на обраному ринку.

На основі проведеного аналізу було сформовано наведений у таблиці 4.12 SWOT-аналіз.

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту.

Сильні сторони	Слабкі сторони
Система поєднує комплексний моніторинг мікроклімату з високою точністю, надійністю та здатністю працювати безперервно. Вона легко налаштовується під різні умови й інтегрується у більші	Висока собівартість обмежує доступність системи та звужує ринок. Монтаж і налаштування можуть бути складними для непідготовлених користувачів, тому потрібен професійний супровід. Стартап

мережі, що робить її гнучким рішенням. На ринку немає прямих українських аналогів, а компетентність команди у вимірювальних технологіях і зоології підсилює конкурентні переваги.	має обмежені ресурси й залежить від імпорتنих компонентів, що створює валютні та логістичні ризики, а відсутність брендової впізнаваності знижує довіру клієнтів.
Можливості	Загрози
1. Підвищення стандартів 2. Ріст інтересу до технологій в зоопарках 3. Нові технології здешевлюють компоненти 4. Гранти та програми підтримки інновацій 5. Відсутність прямих конкурентів у ніші	1. Економічна криза, спад доходів 2. Поява сильного конкурента 3. Зміна вподобань або трендів 4. Регуляторні перепони, сертифікація (юридичний фактор) 5. Залежність від постачання електроенергії

Стартап TerraBat має міцний фундамент у вигляді ряду внутрішніх сильних сторін, серед яких технологічна перевага та новизна рішення на ринку. Ці сильні сторони дозволяють з оптимізмом дивитися на перспективи проекту, особливо у поєднанні з тими можливостями ринку, що були ідентифіковані (відсутність конкуренції, інтерес до інновацій у сфері утримання тварин). Водночас, SWOT-аналіз виявив і критичні виклики: основні ризики лежать у площині комерціалізації – чи знайдеться достатньо платоспроможних клієнтів, чи вистачить ресурсів у стартапу, щоб подолати початкові бар'єри. У проекту є слабкі місця, на які потрібно звернути особливу увагу при плануванні стратегії (наприклад, необхідність спрощення користувацького досвіду та зниження витрат). Зовнішні загрози, зокрема економічні, також не можна ігнорувати – стартапу потрібна гнучкість, щоб адаптуватися до мінливих умов (наприклад, мати «План Б» у разі форс-мажорів). Загальний висновок: TerraBat може досягти успіху за умови реалізації стратегії, яка використовує його унікальні переваги і проактивно адресує ризики.

4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту

Виходячи з сегментації (табл. 4.5), стартап має два основні цільові сегменти споживачів: (А) зоопарки/організації та (В) приватні ентузіасти. Стратегії охоплення ринку бувають трьох типів: концентрований маркетинг (фокус лише на одному сегменті), диференційований (кілька сегментів з окремими програмами для кожного) або масовий (стандартний продукт для всіх). Зважаючи на обмежені ресурси і різницю потреб сегментів, обрана модель – диференційований маркетинг з пріоритетом сегменту А. Тобто TerraBat спочатку зосередиться на потребах зоопарків, але не буде ігнорувати і приватних клієнтів, адаптуючи маркетингові заходи під кожен сегмент.

У таблиці 4.13 наводиться вибір цільових груп і оцінка привабливості кожної з точки зору нашої стратегії. На основі цієї оцінки прийняте рішення щодо охоплення.

Таблиця 4.13 – Вибір цільових груп потенційний споживачів

№	Опис цільової групи	Готовність сприйняти продукт	Орієнтовний попит	Інтенсивність конкуренції	Простота входу в сегмент
1	А: Зоопарки та подібні установи. Великий професійний клієнт (юридична особа), що утримує колекції тварин.	Висока – є мотивація покращувати умови, якщо продукт доведе ефективність. Після успішних пілотів готовність до впровадження зросте.	Невеликий: в Україні всього кілька потенційних замовлень (5–10 систем сумарно). Але кожне замовлення значне за обсягом (можливо, один зоопарк замовить кілька комплектів).	Низька – відсутні прямі конкуренти, можлива лише конкуренція з традиційними методами (ручний контроль або HVAC системи загального призначення).	Середня – вхід в сегмент ускладнений необхідністю переконати вартістю/якістю (тривалі переговори, тендери). Але кількість клієнтів мала – їх легко ідентифікувати й адресно працювати з кожним.

2	В: Приватні власники екзотичних тварин. Індивідуальні клієнти, що тримають 1–2 кажанів у себе вдома.	Помірна – зацікавлені у здоров’ї улюбленця, але можуть сумніватися через ціну та складність. Потрібна демонстрація переваг.	Дуже малий: потенційно десятки покупців по країні. Попит нестабільний, ситуативний (поява/зникнення ентузіастів).	Середня – конкуренція з дешевими термостатами та саморобними рішеннями, до яких ця група схильна. Наш прямий конкурент – імпорتنі гаджети (Zoo Med тощо).	Висока – легко достукатися через онлайн-спільноти, прямий продаж. Але складніше переконати купити дорогий пристрій. Вхід простий, але конверсія низька.
3	С: Наукові та освітні установи. Лабораторії, університети, де можуть експериментально тримати тварин.	Середня – зацікавлені функціоналом, але обмежені коштами. Потребують переконання, що це інвестиція в науку.	Дуже малий: 1–2 можливі замовлення (якщо буде спецпроект/грант).	Низька – прямих конкурентів немає, альтернативи – ручні методи досліджень.	Низька – вхід через академічні контакти, довгі узгодження, залежність від фінансування.

За результатами оцінки, основними цільовими групами для TerraBat обрано: (А) зоопарки – як пріоритетний сегмент, та (В) приватні власники – як другорядний сегмент, що буде опрацьовуватися після виходу на ринок (через адаптацію продукту). Стратегія охоплення, таким чином, диференційована: для кожного з двох сегментів буде розроблено окрему маркетингову пропозицію. Для сегменту А – це повнофункціональна професійна система з акцентом на надійність і сервіс, для сегменту В – спрощена версія (можливо, з меншою кількістю функцій або DIY-комплект), більш доступна за ціною. Водночас комунікаційні та збутові канали також різнитимуться: В2В-продажі в зоопарки через персональні контакти і тендери, а В2С-продажі приватним особам – через інтернет-магазин, соцмережі, тематичні форуми. Такий підхід

дозволить максимально охопити потенційний ринок, не розпилюючи зусиль, але і не втрачаючи можливостей.

Наступний крок – обрати базову стратегію конкуренції для TerraBat. В класичній теорії (М.Портер) існує три варіанти: стратегія цінового лідерства, стратегія диференціації та стратегія фокусування. З урахуванням аналізу сильних/слабких сторін та характеру ринку, для нашого стартапу оптимальною є стратегія диференціації на основі фокусування. Це означає, що TerraBat зосереджується на вузькому сегменті і пропонує продукт з унікальними відмінними якостями, замість конкурування за ціною. Наш продукт завідомо не буде найдешевшим, але ми робимо ставку на якість, інноваційність та експертність, щоб випереджати конкурентів у цінності пропозиції.

У таблиці 4.14 формалізовано вибір базової стратегії розвитку, показано логіку: яку альтернативу розвитку проекту обрано, яка стратегія охоплення (з попереднього пункту) і які конкурентні позиції будуть ключовими при цій альтернативі.

Таблиця 4.14 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Використати сильні сторони стартапу, щоб максимально реалізувати ринкові можливості ніші. Зосередитися на сегменті зоопарків, де TerraBat має найбільшу цінність, і	Диференційований маркетинг (пріоритет сегмент А, додатково сегмент В своїм каналом).	– Висока якість та надійність продукту – Глибоке розуміння потреб клієнта – Постійний зв'язок з клієнтом і підтримка (– Репутація інноватора у сфері welfare-технологій для тварин.	Спеціалізація з диференціацією (фокус на ніші з унікальною пропозицією).

	закріпитися як експертне рішення №1 для мікроклімату.			
--	---	--	--	--

Обрана базова стратегія – стратегія диференціації – полягає у тому, що TerraBat буде конкурувати не ціною, а унікальними властивостями продукту та експертним сервісом. Це поєднується зі стратегією фокусування, адже ми працюємо в межах вузького ринку (вольєри рукокрилих). Такий підхід логічний, тому що наш клієнт готовий платити за вирішення специфічної проблеми, і важливо запропонувати йому найкраще рішення, а не найдешевше. Очікується, що стратегія диференціації дозволить: по-перше, уникнути прямої цінової конкуренції з масовими виробниками побутових приладів; по-друге, сформувати лояльність клієнтів через унікальну експертну цінність (нас рекомендуватимуть інші зоопарки, що цінують якість); по-третє, з часом отримати преміальну маржинальність, коли бренд стане асоціюватися з високим стандартом.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем»?	Орієнтація на нових чи існуючих споживачів?	Чи буде копіювання конкурентів?	Стратегія конкурентної поведінки
Так, комплексних рішень на ринку майже немає	Переважно нові споживачі; частково – перехід від простих контролерів	Ні, замість копіювання – підсилена диференціація	Стратегія лідера-новатора (розширення попиту)

«TerraBat» має позицію першопрохідця, тому оптимально застосувати інноваційну стратегію лідера з акцентом на формування попиту та диференціацію замість копіювання конкурентів. Такий підхід забезпечує найкращий старт на ринку нішевих систем мікроклімату.

На основі потреб цільових аудиторій (табл. 4.5) і обраної стратегії диференціації, сформульовано унікальну торговельну пропозицію (УТП)

TerraBat і ті асоціації, які мають виникати у клієнта при згадці про наш бренд. TerraBat планується позиціонувати як «інноваційна система для турботи про тварин», що забезпечує неперевершену якість середовища для екзотичних видів. Ключовими акцентами у позиціонуванні будуть: надійність, точність та професійна експертиза. Для приватних клієнтів додатково акцентуватиметься зручність та безпека використання. У таблиці 4.16 узагальнено вибір стратегії позиціонування для двох основних сегментів.

Таблиця 4.16 – Стратегія позиціонування TerraBat на ринку

№	Вимоги цільової аудиторії	Базова стратегія	Ключові конкурентні позиції нашого проекту	Асоціації для формування позиції (3 ключові)
1.	Зоопарки: потребують рішення, яке гарантовано поліпшить добробут тварин, на яке можна покластися (не підведе).	Диференціація через якість та експертність.	– Високоякісний, інженерно обґрунтований продукт. – Індивідуальний підхід – Постійний зв'язок з клієнтом.	Надійність, Професіоналізм, Інноваційність.
2.	Приватні власники: хочуть простого у використанні і безпечного пристрою, щоб не перейматися умовами для улюбленця.	Диференціація через зручність та спеціалізацію.	– Зручність та автоматизація – Безпечність та перевіреність – Спільнота та підтримка.	Легкість, Безпека, Довіра.

Відповідно до цієї схеми, TerraBat буде просуватися на професійному ринку як високотехнологічний преміум-продукт, а на споживчому – як надійний «няня»-гаджет для екзотичної тварини. Асоціації «надійний – професійний – інноваційний» ми закріплюватимемо через кейси (демонстрація успішних впроваджень у зоопарках, відгуки ветеринарів). Асоціації «легкий – безпечний – той, що викликає довіру» для приватних – через акцент на тому, що TerraBat перевірений у серйозних умовах, а тепер

доступний і для дому, з гарантією.

Варто зазначити, що обидва позиціонування не суперечать одне одному, а швидше доповнюють: у центрі – якість і турбота про тварин. Таким чином, єдиний бренд TerraBat може обслуговувати два сегменти, змінюючи акценти комунікації.

Щодо стратегії конкурентної поведінки: наша компанія фактично буде піонером у своїй ніші, тому на першому етапі поведінка відповідає стратегії «розширення первинного попиту». Ми не стільки відбираємо частку ринку у конкурентів, як створюємо новий ринок, навчаючи клієнтів, що такий продукт взагалі існує і вирішує їх проблеми. Тобто, багато зусиль піде на освітні заходи, демонстрацію прототипів, пілотні установки – щоб переконати цільових клієнтів у необхідності TerraBat. Надалі, якщо з'являться конкуренти, будемо дотримуватися оборонної стратегії лідера: постійне вдосконалення продукту, утримання клієнтів сервісом, розширення лінійки, щоб новим гравцям було складно відвоювати частку.

У таблиці 4.17 узагальнено ключові потреби цільових користувачів системи «TerraBat» та ті вигоди, які забезпечує продукт у відповідь на ці потреби. На основі цього визначено конкурентні переваги, що формують концепцію товару та відрізняють його від існуючих рішень на ринку.

Таблиця 4.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Забезпечення стабільного мікроклімату для тварин, чутливих до терморегуляції	Автоматичний комплексний контроль параметрів (температура, вологість, CO ₂ , освітлення)	Комплексність системи, висока точність вимірювань, адаптація під вид тварини
2	Мінімізація ризиків для здоров'я тварин через людський фактор	Інтелектуальні алгоритми попередження та аварійні сценарії	Система аналітики, push-сповіщення, захищені алгоритми

			реагування
3	Дистанційний моніторинг і зручність керування	Керування з телефону/ПК, історія даних, графіки	Хмарний сервіс, збереження даних, доступ з будь-якої точки
4	Потреба у спеціалізованому рішенні для зоопарків, розплідників, лабораторій	Налаштування профілів під конкретні види тварин	Спеціалізація, відсутність прямих аналогів на ринку
5	Зменшення витрат часу власника/персоналу	Автоматизація рутинних процесів	Значне зменшення ручних дій, підвищення надійності роботи системи

Подані у таблиці переваги демонструють, що концепція «TerraBat» базується на комплексності, точності, спеціалізації під різні види тварин та високому рівні автоматизації. Це формує унікальну ринкову позицію, яку не можуть забезпечити наявні сегментні або загального призначення контролери. Виявлені вигоди підтверджують конкурентоспроможність продукту та доцільність його подальшого розвитку.

У таблиці 4.18 подано трирівневу модель товару, що розкриває логіку формування цінності продукту «TerraBat» від базової ідеї до реального виконання та сервісної підтримки. Такий підхід дозволяє структурувати функціональні, технічні й додаткові характеристики системи. Модель показує, як первинна потреба у стабільному мікрокліматі трансформується у конкретні технологічні рішення та супровідні послуги. Це створює цілісне уявлення про товар для подальшого маркетингового позиціонування.

Таблиця 4.18 – Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Основна ідея – забезпечення стабільного та безпечного мікроклімату для тварин, чутливих до змін терморегуляції. Головна вигода – автоматизований контроль середовища та зменшення ризиків для здоров'я тварин.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Високоточні датчики	М	Тх
	2. Програмне забезпечення для аналізу та контролю середовища	Нм	Тл
	3. Хмарний сервіс зі зберіганням даних та дистанційним доступом	Нм	Ор

	4. Модульна конструкція пристрою та можливість розширення	М	Вр
	5. Оптимізація енергоспоживання та мінімальні експлуатаційні витрати	Нм	Е
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування тощо		
	Марка: IBC «TerraBat»		
III. Товар із підкріпленням	Гарантійне обслуговування, технічна підтримка, хмарний сервіс, push-сповіщення, оновлення ПЗ, можливість масштабування та додавання нових модулів.		

Трирівнева модель демонструє, що «TerraBat» формує комплексну ціннісну пропозицію, у якій поєднано точні вимірювальні технології, зручність експлуатації та розширені сервісні можливості. Наявність підкріплення у вигляді хмарних сервісів, підтримки та оновлень істотно збільшує довіру користувачів та підвищує тривалість життєвого циклу товару. Така структура підсилює конкурентоспроможність та покращує сприйняття бренду на ринку. У підсумку модель підтверджує, що продукт готовий до роботи у різних цільових сегментах і має потенціал масштабування.

На цьому етапі визначається оптимальна система збуту (табл. 4.19) для стартап-проекту TerraBat, що враховує специфіку поведінки цільових клієнтів, вимоги до технічної підтримки та рівень складності продукту. Завдання полягає у виборі каналу збуту, який забезпечить мінімальні бар'єри для купівлі та максимальну якість обслуговування.

Таблиця 4.19 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Клієнти прагнуть отримати повну технічну консультацію перед купівлею; переважно купують онлайн	Надання інформаційної підтримки, консультації з підбору конфігурації, демонстрація функціоналу	Прямий канал (0 рівнів)	Прямий онлайн-збут через сайт TerraBat
2	Частина клієнтів	Логістичний	1 рівень	Робота з

	віддає перевагу купівлі через посередників	супровід, післяпродажне навчання персоналу	(дилери/партнери)	офіційними дилерами у своєму регіоні
3	Важлива оперативність поставки та гарантія якості	Гарантійне обслуговування, виїзна підтримка	Комбінована модель	Власний збут + сервісні партнери
4	Клієнти потребують можливості швидкого ремонту або заміни модулів	Забезпечення складу запчастин і сервісу	Прямий канал	Власний авторизований сервіс

Оптимальною для TerraBat є комбінована система збуту, що включає прямий онлайн-канал та мережу офіційних партнерів. Такий підхід забезпечує високу контрольованість якості сервісу й одночасно дозволяє охопити професійних клієнтів через дилерів. Власний сервіс стає критично важливою перевагою, оскільки продукт має технічний характер і потребує підтримки. Обрана система сприяє формуванню довгострокової лояльності та зменшує бар'єри входження для нових сегментів.

Концепція маркетингових комунікацій (табл. 4.20) визначає, через які канали TerraBat буде доносити інформацію до цільових сегментів та які ключові повідомлення мають сформувати правильне сприйняття бренду. Основою є стратегія позиціонування та вимоги клієнтів до інноваційних систем контролю мікроклімату.

Таблиця 4.20 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються клієнти	Ключові позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Власники кажанів та інших екзотичних домашніх тварин	Instagram, YouTube, TikTok, зоофоруми	Безпека та точність контролю мікроклімату	Пояснити користь автоматизації та зниження ризику хвороб	«TerraBat – стабільний мікроклімат без постійного нагляду»

	активно шукають інформацію онлайн				
2	Професійні заводчики, ферми, реабілітаційні центри – орієнтовані на практичні докази	Вебінари, конференції, професійні спільноти	Надійність, сертифіковані компоненти, масштабованість	Підкреслити довгострокову економію та ефективність	«Інтелектуальна система, що працює 24/7 з промисловою стабільністю»
3	Зоомагазини, дилери – шукають продукти з попитом та підтримкою виробника	Е-mail- розсилки, особисті презентації, B2B- платформи	Підтримка постачальника, швидкий сервіс	Стимулювати партнерство та вигоди від співпраці	«TerraBat – продукт, що продається сам завдяки попиту та сервісу»

Комунікаційна стратегія TerraBat має базуватися на поєднанні візуального контенту для кінцевих користувачів і технічного контенту для професійних сегментів. Основні повідомлення повинні формувати уявлення про надійність, точність та інтелектуальність системи, підкреслюючи унікальність проєкту серед конкурентів. Різні сегменти клієнтів мають отримувати адаптовані повідомлення, що відповідають їх рівню компетентності та мотивації. Такий підхід дає змогу ефективно позиціонувати TerraBat як професійне, але доступне рішення для контролю мікроклімату.

4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проєкту та оцінювання його економічної ефективності

У цьому підрозділі викладено практичні аспекти впровадження стартапу TerraBat – автоматизованої ІВС для контролю мікроклімату в інсталяційних приміщеннях. Наведено опис команди проєкту, поетапний план-графік робіт, організацію виробництва, структуру бізнес-моделі (за Canvas) та попередні фінансові розрахунки, що дозволяють оцінити економічну доцільність проєкту.

Для малого стартапу TerraBat пропонується компактна команда (до 5 осіб), де кожен має чіткі функціональні завдання (табл. 4.21).

Таблиця 4.21 – Команда проекту

Посада	Обов'язки
СЕО	Стратегія продукту, управління командою, прийняття ключових рішень.
СТО	R&D, технічна архітектура, апаратна та програмна частина, контроль виконання техзавдань.
Маркетолог	Просування продукту, аналіз ринку, формування попиту.
Інженер-програміст / IoT	Збірка контролера, датчики, ПЗ, хмара, технічне сервісне обслуговування.
Сервісний інженер	Монтаж, гарантійне обслуговування, підтримка клієнтів.

Такий склад враховує основні компетенції: бізнес-лідерство, розробка технологічного продукту, просування на ринку і підтримка клієнтів. Залучення додаткових фахівців (дизайнер інтерфейсів, юрист, монтажник) планується разово для виконання специфічних завдань, але ядро команди залишиться невеликим, щоб знизити постійні витрати.

План-графік реалізації проекту розраховано на 12–18 місяців після завершення НДДКР. Основні етапи наведені у табл. 4.22.

Таблиця 4.22 – Календарний графік реалізації

Етап	Тривалість	Стисла суть робіт
1. Створення підприємства	1–2 міс.	Реєстрація, документація, закупівля компонентів.
2. Прототипування	3–4 міс.	Ручна збірка та тестування прототипу, корекція ПЗ і конструкції.
3. Пілот	5–6 міс.	Встановлення в зоопарку, спільна експлуатація, відгуки.
4. Оптимізація	7–8 міс.	Доопрацювання продукту, документація, сертифікація.
5. Підготовка	9–10 міс.	Налагодження серійної збірки,

виробництва		маркетингові матеріали.
6.Комерційний запуск	11–12 міс.	Початок продажів, демонстрації, планування масштабування.

Система TerraBat за своєю природою – багатофункціональний прилад із низьким обсягом серій. Виробничу стратегію вибудовано за такими принципами:

- На початку збирання систем TerraBat здійснюється вручну командою на орендованій невеликій площі. Це дає гнучкість і знижує витрати. На такій базі 2 фахівців можуть збирати до 5 систем на місяць, що достатньо для запуску серії.
- Кожна зібрана система проходить перевірку за чек-листом: тестуються всі датчики і реле з еталонними приладами, імітується робота в різних сценаріях. Така 100% перевірка забезпечує, що клієнт отримає надійну налаштовану систему.
- Датчики й електронні модулі закупаються у офіційних дистриб'юторів – це гарантує стабільність характеристик. Для деяких не критичних комплектуючих можна розглядати китайські аналоги, щоб знизити ціну.
- Якщо продажі підуть десятками, передбачено передати частину виробництва на контрактну базу – власну збірку на невеликій ділянці або завод-партнер. При цьому ядро проєкту залишатиметься в R&D і контролі якості.

Такий підхід поєднує низькі витрати на старті і можливість нарощувати обсяги за рахунок партнерських підрядів. Він базується на моделі «версатильного виробництва», що поширена у малосерійному приладобудуванні.

Для узагальненого опису бізнес-моделі стартапу TerraBat

використовуємо формат Canvas (табл. 4.23).

Таблиця 4.23 – Бізнес-модель Canvas

Ключові партнери Постачальники компонентів (ОВЕН – ПЛК, S+S Regeltechnik та ін. – датчики), сервісні центри електроніки, зоопарки-партнери, зоомагазини й блогери	Ключові види діяльності R&D, виробництво і збірка систем, монтаж та налагодження обладнання на місцях, технічна підтримка і сервісне обслуговування, маркетинг і продажі.	Ціннісна пропозиція Автоматизована система контролю мікроклімату гарантує оптимальні умови для нільських крилані зберігаючи їхнє здоров'я та життя.	Взаємовідносини з клієнтом Кожному зоопарку виділяється персональний менеджер із команди. Планується створення спільноти користувачів TerraBat.	Споживчий сегмент B2B: зоопарки, розплідники рідкісних тварин та лабораторії, що утримують чутливі види. B2C: приватні ентузіасти й фермери, які утримують екзотичних кажанів у домашніх умовах
	Ключові ресурси Технічний досвід і know-how команди. Обладнання для прототипування та тестування, інструменти монтажу. Початковий капітал. Зв'язки у зоосфері		Канали збуту Прямі продажі через особисті контакти і виставки (для B2B); вебсайт, соцмережі, тематичні форуми (для B2C).	
Структура витрат Собівартість виробництва системи. R&D, мінімальні зарплати, оренда майстерні/офісу, маркетинг.			Потоки надходження доходів Продажі комплектів TerraBat. Розробка індивідуальних модулів, регулярна плата за обслуговування.	

Ця Canvas-модель підкреслює, що TerraBat – продуктово-сервісна компанія B2B2C: ми продаємо рішення клієнтам та підтримуємо їх після продажу. Основний акцент – на цінності для вузького сегменту і довгострокових відносинах, що стимулює повторні доходи (сервіс, масштабування) та позитивне «сарафанне радіо».

Фінансова модель проекту базується на структурі витрат, сформованій згідно з технічною конфігурацією системи та трудовими ресурсами,

необхідними для її виготовлення, програмування і введення в експлуатацію.

Першим кроком є визначення вартості комплектуючих, які формують матеріальну основу системи (табл 4.24):

Таблиця 4.24 – Розрахунок приблизної вартості комплекту системи

Компонент	Ціна за одиницю (грн)	Кількість	Вартість (грн)
ОВЕН ПЛК	20000	1	20000
Датчик температури Pt1000	800	9	7200
Датчик відносної вологості (RH)	2500	1	2500
Датчик освітленості	1500	1	1500
Реле та інтерфейсні модулі	2000	1	2000
Зволожувач	2000	1	2000
Нагрівач	6000	1	6000
Інші комплектуючі (корпус, дроти, тощо)	2 000	1	2 000
Усього (≈)			43 200

Сумарна вартість матеріалів становить 43200 грн. Цей показник визначає основну частину собівартості, але для формування повної калькуляції необхідно врахувати також трудові витрати. Оскільки збірка, налаштування та пусконаладжувальні роботи виконуються фахівцями з відповідними компетенціями, їх оцінка спирається на середній рівень оплати праці у сфері інженерно-технічних послуг в Україні. Збірка обладнання потребує орієнтовно 8 год роботи технічного спеціаліста, налаштування програмного забезпечення контролера і перевірка алгоритмів вимагають близько 6 год роботи інженера, а виїзна пусконаладка займає 1 день.

Для розрахунку використано усереднені погодинні ставки: 300 грн за годину технічного спеціаліста та 500 грн за годину інженера автоматизації. Виїзна пусконаладка оцінена у 2500 грн. Сукупні трудові витрати подано у таблиці 4.25.

Таблиця 4.25 – Трудові витрати на виготовлення і введення системи в експлуатацію

Етап робіт	Тривалість	Погодинна ставка	Вартість
Монтажно-збірні роботи	8 год	300 грн	2400
Програмування і тестування	6 год	500 грн	3000
Пусконаладка на об'єкті	фіксовано		2500
Разом			7900

Узагальнення матеріальних і трудових витрат дає значення повної собівартості одного комплекту. Підсумкова калькуляція подана у таблиці 4.26.

Таблиця 4.26 – Розрахунок собівартості системи

Стаття витрат	Вартість
Вартість компонентів	43200
Трудові витрати	7900
Собівартість комплекту	51100

На основі отриманої собівартості формується ціна реалізації. Урахуванням загальноприйнятої маржі для вимірювальних систем (30 % для B2B сегменту) отримано рекомендовану продажну ціну. Розрахунок подано у таблиці 4.27.

Таблиця 4.27 – Розрахунок рекомендованої ціни реалізації

Показник	Значення
Собівартість	51100
Маржинальний коефіцієнт	1.3
Ціна реалізації	66430

За умови реалізації 10 систем на рік прогнозована виручка становитиме приблизно 664300 грн. Валовий прибуток визначається як різниця між виручкою та змінними витратами, тобто витратами на виробництво відповідної кількості комплектів. Для 10 одиниць змінні витрати становитимуть 511000 грн. Таким чином, очікуваний валовий прибуток дорівнює 153300 грн.

Постійні витрати стартапу охоплюють мінімальні адміністративні витрати, оренду, маркетингові активності та часткові витрати на підтримку. За оцінками, їх рівень становить близько 490000 грн на рік. Це дозволяє

розрахувати операційний результат і точку беззбитковості.

Оскільки маржинальний прибуток з однієї системи дорівнює різниці між ціною реалізації та собівартістю (15330 грн), точка беззбитковості визначається як відношення постійних витрат до маржинального прибутку. Розрахунок показує, що необхідний мінімальний обсяг продажу становить близько 33 комплектів на рік.

Узагальнюючи виконані розрахунки, можна зазначити, що фінансова модель демонструє відповідність структури витрат особливостям складного технічного продукту. Повна собівартість формується переважно високою ціною компонентів та залученням кваліфікованих інженерних кадрів. Маржинальність забезпечує можливість покриття змінних витрат, однак для досягнення беззбитковості необхідно наростити обсяги реалізації або оптимізувати постійні витрати. Таким чином, модель відображає як економічний потенціал проекту, так і вимоги до його масштабування.

Початкові інвестиції охоплюють одноразові витрати на створення підприємства та підготовку до початку виробництва. Зазвичай це включає витрати на реєстрацію компанії, юридичні та ліцензійні послуги, придбання обладнання і інструментів, формування початкових запасів комплектуючих, розробку маркетингових матеріалів та мінімальний фонд оплати праці до першого продажу. Для нашого стартапу приблизний прогноз початкових інвестицій наведено у табл 4.28.

Таблиця 4.28 – Оцінка початкових інвестицій стартапу TerraBat

Вид витрат	Сума, грн
Реєстрація та юридичні послуги (ТОВ, ліцензії)	15 000
Закупівля обладнання та інструментів	250 000
Маркетингові матеріали (брендинг, сайт, друк)	50 000
Оренда, комунальні та ЗП (2–3 міс. до продажу)	150 000
Початкові запаси комплектуючих	50 000
Всього (прибл.)	515 000

Витрати, наведені вище, ілюструють типовий склад стартових витрат

(обладнання, маркетинг, операційні потреби та резервні кошти). Згідно з рекомендаціями бізнес-планування, ретельне врахування всіх стартових витрат, включно з маркетингом та підготовкою виробництва, необхідне для уникнення браку коштів на першому етапі.

Точка беззбитковості (BEP) – це обсяг продажів, при якому виручка повністю покриває сумарні витрати, і прибуток нульовий. Формула розрахунку точкової беззбитковості в одиницях продукції така: $Q = \frac{FC}{P-VC}$, де FC – постійні витрати, P – ціна одиниці продукції, VC – змінні витрати на одиницю.

В нашому випадку: $P = 66\,430$ грн, $VC = 51\,100$ грн, $FC = 490\,000$ грн/рік. Відповідно, гранична маржинальна прибутковість на одиницю складає $P - VC = 15\,330$ грн. Тоді розрахунок точки беззбитковості: $BEP = \frac{490\,000}{66\,430 - 51\,100} = 32$ системи/рік

ROI (Return on Investment) – показник рентабельності інвестицій, що визначається як відношення прибутку до вкладених коштів. Формула для розрахунку проста: $ROI = \frac{\text{Чистий прибуток}}{\text{Інвестиції}} \times 100\%$.

Для оцінки різних сценаріїв припустимо, що початкові інвестиції склали близько 515 000 грн (див. табл. 4.28). Далі розраховуємо прибуток за 3 роки та ROI для реалізації по 10, 20, 40, 60 систем на рік (припускаємо стабільний обсяг реалізації кожного року, фіксовані витрати 490 000 грн/рік).

Таблиця 4.29 – Чистий прибуток і ROI за 3 роки при різному обсязі продажів

Сценарій продажів, шт/рік	Чистий прибуток за 3 роки, грн	ROI (3 роки), %	Рентабельність, %
10	-1 010 100	-183.7%	-50,7
20	-550 200	-100.0%	-13,8
40	+369 600	+67.2%	+4,6
60	+1 289 400	+249.5%	+10,8

При 10 або 20 системах на рік проект залишається збитковим (ROI від'ємний). Позитивна віддача спостерігається починаючи з 40 систем: 3-річний чистий прибуток становить ~370 тис. грн, що дає $ROI \approx 67\%$ (тобто вкладені кошти повернуться з додатком майже 2/3 від початкових витрат). У сценарії 60 систем/рік чистий прибуток понад 1,28 млн грн і $ROI \approx 250\%$.

Крім прямого фінансового результату, важливим є соціальний ефект проекту. Успішне впровадження TerraBat знижує ризик втрати дорогоцінних тварин: один нільський крилан може коштувати вартість десятків тисяч гривень і нерідко є незамінним в екосистемі, тому запобігання їх загибелі має неабияку цінність. До того ж система оптимізує споживання енергії на обігрів/охолодження, зменшуючи експлуатаційні витрати зоопарків, а також скорочує витрати праці персоналу. Ці вигоди не повертаються безпосередньо стартапу, але вони виступають вагомим аргументом для клієнтів.

В довгостроковій перспективі TerraBat може стати платформою для розробки аналогічних рішень для інших видів тварин, що значно підвищує інвестиційну привабливість. Наразі фінансова модель помірно-консервативна: не очікується значних прибутків у перші роки, зате оцінки реалістичні. Імовірна окупність інвестицій на горизонті 3–4 років, що відповідає типовим проектам з апаратною складовою.

Висновки до розділу 4

Стартап-проект TerraBat пройшов стадію концептуального опрацювання: сформовано його технічне і ринкове бачення, структуру бізнес-моделі. Проведені аналізи підтвердили: проект має інноваційну цінність (автоматизація, що ще не має аналогів в зоогалузі України) та ринковий потенціал (невеликий, але реальний платоспроможний сегмент клієнтів). Розроблена стратегія передбачає фокус на якості та спеціалізації, побудову довгострокових відносин з ключовими клієнтами, а маркетингова програма

окреслила конкретні кроки для виходу на ринок і завоювання довіри. Бізнес-модель Canvas показала збалансованість підходу: ми розуміємо, за що платитимуть клієнти і як доставити їм цю цінність, які ресурси потрібні і де можна знайти підтримку. Економічні розрахунки свідчать, що проект можна реалізувати з фінансового погляду, хоча й потребує значних початкових вкладень та терпіння, перш ніж почне приносити прибуток.

З технічного боку зроблено важливі кроки у напрямі створення стабільної, надійної та гнучкої системи, здатної працювати у складних умовах. Архітектура з використанням промислового контролера та прецизійних сенсорів закладає фундамент для подальшої модернізації та масштабування, включно з можливим виходом на зовнішні ринки або адаптацією під інші види тварин. Водночас детально пророблена ринкова та фінансова компонента проекту показує, що TerraBat має не лише технічний потенціал, а й чітке розуміння шляхів комерційної реалізації.

Успішна реалізація стартапу сприятиме підвищенню престижу українських зоопарків, а також дасть можливість власникам екзотичних тварин більш відповідально піклуватися про своїх підопічних. Проект може стати прикладом того, як на перетині інженерії та біології виникають інновації, корисні і для бізнесу, і для суспільства.

ВИСНОВКИ

У роботі показано, що для видів тварин, чутливих до змін терморегуляції, «мікроклімат» не зводиться до одного показника, а є сукупністю взаємопов'язаних умов, які мають підтримуватися стабільно та керовано. Це підтверджується тим, що для тварин виду *Rousettus aegyptiacus* важливі не лише допустимі діапазони температури й вологості, а також наявність теплового градієнта для поведінкової терморегуляції.

Чисельне моделювання підтвердило, що в об'єкті формується переважно вертикальний температурний градієнт за відносно малих горизонтальних відхилень (до 2 °C), а швидкість руху повітря в основному об'ємі стабілізується в межах 0,02–0,08 м/с, що дозволяє опиратися на «висотну» модель розподілу температури як на базову для подальших інженерних рішень.

Реалізація програмної частини в середовищі AQLogic підтвердила, що обрані датчики та інтерфейси можуть бути зведені в цілісну систему вимірювання і керування з опитуванням каналів, обробленням даних і формуванням керувальних дій; додатково аналітична модель використовується як інструмент контролю узгодженості температурних вимірювань і раннього виявлення небажаних відхилень. Оцінювання невизначеностей показує, що для вимірювального каналу температури розширена невизначеність при $k=2$ не перевищує $\pm 3,38$ °C, причому домінуючим чинником є похибка аналогового входу ПР102, а отже подальше підвищення точності раціонально пов'язувати саме зі зміною схеми вимірювання або переходом на точніші вузли перетворення. Для каналів вологості та освітленості розширена невизначеність при $k=2$ є прийнятною та складає 2,94% та 29 лк відповідно, що є допустимим для спроектованої системи.

У процесі розробки стартап-проект «TerraBat» пройшов стадію концептуального опрацювання: сформовано його технічне і ринкове бачення, структуру бізнес-моделі. Проведений аналіз підтвердив: проект має інноваційну цінність (автоматизація, що ще не має багатьох аналогів в зоогалузі України) та ринковий потенціал (невеликий, але реальний платоспроможний сегмент клієнтів).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Wilson D. E. Maintaining bats for captive studies. Ecological and behavioral methods for the study of bats / ed. by T. H. Kunz. Washington, D.C. : Smithsonian Institution Press, 1988. P. 247–264.
2. Egyptian fruit bat. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Egyptian_fruit_bat (дата звернення: 19.10.2025).
3. *Rousettus aegyptiacus* (Pteropodidae) in the Palaearctic: list of records and revision of the distribution range*. URL: <https://nm.cz/admin/files/PM/download/zivotopisy-publikace/benda2011vesp.pdf> (дата звернення: 19.10.2025).
4. Egyptian Fruit Bat - *Rousettus aegyptiacus*. *Endangered Wildlife Trust*. URL: https://ewt.org/wp-content/uploads/2022/11/52.-Egyptian-Fruit-Bat-Rousettus-aegyptiacus_LC.pdf (дата звернення: 19.10.2025).
5. *Rousettus aegyptiacus* (Egyptian rousette). *Animal Diversity Web*. URL: https://animaldiversity.org/accounts/Rousettus_aegyptiacus/ (дата звернення: 19.10.2025).
6. The Natural History of the Egyptian Fruit Bat, *Rousettus aegyptiacus*, in Turkey (Mammalia: Chiroptera). *Digital Commons @ USF - University of South Florida*. URL: https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4493&context=kip_articles (дата звернення: 19.10.2025).
7. *Rousettus aegyptiacus* Geographic Range Habitat. URL: [https://mozart.radford.edu/winesett/Cohen%20ADW%202010\[1\].pdf](https://mozart.radford.edu/winesett/Cohen%20ADW%202010[1].pdf) (дата звернення: 19.10.2025).
8. Reproductive seasonality of the Egyptian fruit bat (*Rousettus aegyptiacus*) at the northern limits of its distribution. *Journal of Mammalogy | Oxford Academic*. URL:

<https://academic.oup.com/jmammal/article/95/5/1036/984003> (дата звернення: 19.10.2025).

9. Nile bat. *Kharkiv Zoo*. URL: <https://zoo.kharkiv.ua/zhivotnye-en/egipetskaya-letuchaya-sobaka> (дата звернення: 19.10.2025).

10. *Rousettus aegyptiacus* (E.Geoffroy, 1810). *GBIF*. URL: <https://www.gbif.org/species/2432953> (дата звернення: 19.10.2025).

11. The feeding pattern of the fruit bat *Rousettus aegyptiacus* in captivity. *PubMed*. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1019753/> (дата звернення: 19.10.2025).

12. The Captive Environment for Old World fruit bats. *AZA Bat Taxon ...*. URL: https://www.battag.org/uploads/6/2/7/6/6276216/paper_-_the_captive_environment_for_old_world_fruit_bats.pdf (дата звернення: 19.10.2025).

13. Measuring the Impact of Light and Sound on Animal Welfare *Lincoln Park Zoo*. URL: <https://www.lpzoo.org/science-project/measuring-the-impact-of-light-and-sound-on-animal-welfare/> (дата звернення: 19.10.2025).

14. BWS-Standards Bats in Captivity. *Bat World Sanctuary*. URL: <https://batworld.org/wp-content/uploads/2022/09/BWS-Standards-for-Bats-in-Captivity.pdf> (дата звернення: 19.10.2025).

15. Fruit Bat-Aza - Standard - Care. *Scribd*. URL: <https://www.scribd.com/document/388163862/Fruit-bat-aza-standard-care-doc> (дата звернення: 19.10.2025).

16. Sociality above everything in the Egyptian fruit bat. *Springer Nature Communities*. URL: <https://communities.springernature.com/posts/sociality-above-everything-in-the-egyptian-fruit-bat> (дата звернення: 19.10.2025).

17. Finding Your Friends at Densely Populated Roosting Places: Male Egyptian Fruit Bats (*Rousettus aegyptiacus*) Distinguish between Familiar and

Unfamiliar Conspecifics. *Acta Chiropterologica*. Vol. 13, no. 2. URL: <https://bioone.org/journals/acta-chiropterologica/volume-13/issue-2/150811011X624893/Finding-Your-Friends-at-Densely-Populated-Roosting-Places--Male/10.3161/150811011X624893.short> (дата звернення: 19.10.2025).

18. Finding Your Friends at Densely Populated Roosting Places: Male Egyptian Fruit Bats (*Rousettus aegyptiacus*) Distinguish between Familiar and Unfamiliar Conspecifics. *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/249649665_Finding_Your_Friends_at_Densely_Populated_Roosting_Places_Male_Egyptian_Fruit_Bats_Rousettus_aegyptiacus_Distinguish_between_Familiar_and_Unfamiliar_Conspecifics (дата звернення: 19.10.2025).

19. Social Experience of Captive Livingstone's Fruit Bats (*Pteropus livingstonii*). *PMC*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7460041/> (дата звернення: 19.10.2025).

20. Pair bonds in bats - From so simple a beginning. *Willy van Strien blog*. URL: <https://blog.willyvanstrien.nl/2019/06/03/pair-bonds-in-bats/> (дата звернення: 19.10.2025).

21. ENRICHMENT AND SECURITY. *Bat World Sanctuary*. URL: <https://batworld.org/wp-content/uploads/2021/06/Housing-and-Enrichment.pdf> (дата звернення: 19.10.2025).

22. Spatial activity and feeding ecology of the endangered northern population of the Egyptian fruit bat (*Rousettus aegyptiacus*). *Journal of Mammalogy* | *Oxford Academic*. URL: <https://academic.oup.com/jmammal/article/97/3/815/2459682> (дата звернення: 19.10.2025).

23. Bats. *Louisiana Department of Wildlife and Fisheries*. URL: <https://www.wlf.louisiana.gov/page/bats> (дата звернення: 19.10.2025).

24. Straw-Coloured Fruit Bat - Facts, Diet, Habitat & Pictures. *Animalia.bio*. URL: <https://animalia.bio/straw-coloured-fruit-bat> (дата звернення: 19.10.2025).

25. Fruit bat diets in captivity often include things like banana, apples, pears, cantaloupe, watermelon, honeydew melon, grapes, and less popular items like broccoli and kale!. *Reddit*. URL: https://www.reddit.com/r/BatFacts/comments/3hg553/fruit_bat_diets_in_captivity_often_include_things/ (дата звернення: 19.10.2025).

26. Fruit Bat: Predator-Prey Interactions, Fights, and Aggressive Behaviors. *Animal Matchup*. URL: <https://www.animalmatchup.com/animal/fruit-bat> (дата звернення: 19.10.2025).

27. Thermoregulation by captive and free-ranging Egyptian rousette bats (*Rousettus aegyptiacus*) in South Africa. *Journal of Mammalogy | Oxford Academic*. URL: <https://academic.oup.com/jmammal/article/98/2/572/2997442> (дата звернення: 19.10.2025).

28. Thermoregulation by captive and free-ranging Egyptian rousette bats (*Rousettus aegyptiacus*) in South Africa. *UPSpace - University of Pretoria*. URL: <https://repository.up.ac.za/handle/2263/60140> (дата звернення: 19.10.2025).

29. Core body temperatures (°C) for a free-ranging male Egyptian rousette.... *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/figure/Core-body-temperatures-C-for-a-free-ranging-male-Egyptian-rousette-bat-Rousettus_fig2_313823122 (дата звернення: 19.10.2025).

30. Evaporative Cooling as a Thermoregulatory Mechanism in the Fruit Bat, *Rousettus aegyptiacus*. *The University of Chicago Press: Journals*. URL: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.1086/physzool.48.2.30155652> (дата звернення: 19.10.2025).

31. Evaporative Cooling as a Thermoregulatory Mechanism in the Fruit

Bat, *Rousettus aegyptiacus*. *Physiological Zoology*. Vol. 48, No 2. URL: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/physzool.48.2.30155652> (дата звернення: 19.10.2025).

32. Warm bodies, cool wings: regional heterothermy in flying bats. *Biology Letters* - *Journals*. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsbl.2019.0530> (дата звернення: 19.10.2025).

33. Animal Research Lab Red Lighting | Vivarium Lab Lighting. *Kenall Manufacturing*. URL: <https://kenall.com/Animal-Research-Lab-Lighting> (дата звернення: 19.10.2025).

34. Fruit Bat Enrichment Manual. URL: https://www.battag.org/uploads/6/2/7/6/6276216/sop_ten_enrichment_options_for_fruit_bats.pdf (дата звернення: 19.10.2025).

35. Endangered Bat Captive Breeding Project Goes Terribly Wrong. *PEER.org*. URL: <https://peer.org/endangered-bat-captive-breeding-project-goes-terribly-wrong/> (дата звернення: 19.10.2025).

36. Environmental sensors. *DOL-sensors*. URL: <https://www.dol-sensors.com/environmental-sensors/> (дата звернення: 19.10.2025).

37. A bat's eye view [Електронний ресурс]. CPRE. Режим доступу: <https://www.cpre.org.uk/discover/a-bats-eye-view/> (дата звернення: 05.12.2025).

38. Lighting Assessment for Bats [Електронний ресурс]. Southwest Environmental. Режим доступу: https://www.southwest-environmental.co.uk/further%20info/sustainability_consultants/lighting_assessment/Lighting_Assessment_For_Bats.html (дата звернення: 05.12.2025).

39. Light Sensor including Photocell and LDR Sensor [Електронний ресурс]. Electronics Tutorials. Режим доступу: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_4.html (дата звернення: 05.12.2025).

40. Light Meter PCE-LXT [Електронний ресурс]. PCE Instruments. Режим доступу: https://www.pce-instruments.com/us/measuring-instruments/test-meters/light-meter-pce-instruments-light-meter-pce-lxt-det_5999920.htm?srsId=AfmBOoo4lEehLIfwUQ2P9MI0dhS0bfzgj750VD6V3T-_VOA-PKgts3Rl (дата звернення: 05.12.2025).

41. TEPT4400 VISHAY, Phototransistor, 570 nm, 30° [Електронний ресурс]. Newark Electronics. Режим доступу: <https://www.newark.com/vishay/tept4400/transistor-photo-npn-570nm-t-1/dp/28M9651> (дата звернення: 05.12.2025).

42. TSL250R light to voltage sensor [Електронний ресурс]. Denkov A E LTD. Режим доступу: <http://denkovi.com/tsl250r-light-to-voltage-sensor> (дата звернення: 05.12.2025).

43. Analog Output Light Sensor 0-5V/4-20mA for Greenhouse Illumination [Електронний ресурс]. Alibaba. Режим доступу: https://www.alibaba.com/product-detail/Analog-output-0-5V-0-10V_60794542952.html (дата звернення: 05.12.2025).

44. SLO320_03-00120-03_A4 (документ у форматі PDF) [Електронний ресурс]. Schneider Electric. Режим доступу: https://iportal2.schneider-electric.com/Contents/docs/%5ESLO320_03-00120-03_A4.PDF (дата звернення: 05.12.2025).

45. Outdoor light intensity sensor PHOTASGARD AHKF I [Електронний ресурс]. S+S Regeltechnik (spluss.de). Режим доступу: <https://www.spluss.de/en/products/outdoor-light-intensity-sensor-photasgard-ahkf-i-1601-1112-1000-000-p3688?shpxid=c3f59b78-e05e-4ee4-a4a4-e8b9978b4da8> (дата звернення: 05.12.2025).

46. Illumination sensor [Електронний ресурс]. Renkeer. Режим доступу: <https://www.renkeer.com/product/illumination-sensor/> (дата звернення: 05.12.2025).

47. Програмне забезпечення AqLogic [Електронний ресурс]. Aqteck. Режим доступу: <https://aqteck.ua/ua/programne-zabezpechennja/programne-zabezpechennja-aqlogic> (дата звернення: 05.12.2025).

ДОДАТКИ

УДК 628.8:519.6:599.4

*А.А. Герасимчук, студент гр. ПІ-41мп, П. А. Якубович, студент гр. ПІ-41мп
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПОВІТРЯНИХ ПОТОКІВ ТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ У ВЕЛИКОГАБАРИТНОМУ ТЕРАРІУМІ МЕТОДОМ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. У роботі подано результати CFD-моделювання мікроклімату у тераріумі об'ємом 256 м³, призначеному для утримання єгипетського фруктового кажана (*Rousettus aegyptiacus*). Проведено розрахунок повітрообміну, побудовано 3D-модель середовища та виконано чисельний аналіз розподілу температури й швидкості повітря в тераріумі. Результати демонструють однорідність температурних полів у горизонтальних рівнях та передбачуваний вертикальний градієнт, що відповідає біологічним вимогам виду тварин. Отримані дані підтверджують ефективність обраної схеми вентиляції та можливість формування стабільного мікроклімату.

Ключові слова: CFD-моделювання, мікроклімат, тераріум, *Rousettus aegyptiacus*, теплообмін, повітрообмін, ANSYS Fluent, температурне поле, вентиляція, стратифікація.

ВСТУП

Створення контрольованих мікрокліматичних умов у штучному середовищі є одним із найскладніших завдань сучасної інженерної екології та біотехнічних систем. Умови існування тварин, що природно мешкають у стабільних кліматичних середовищах, надзвичайно чутливі до змін температури, вологості, швидкості повітря та інтенсивності повітрообміну. Одним із таких видів є єгипетський фруктовий кажан (*Rousettus aegyptiacus*), який у природі живе у печерах зі сталою температурою, рівномірною вологістю та мінімальною турбулентністю повітря [1]. Коливання цих параметрів у штучному середовищі можуть призвести до хронічного стресу, порушення терморегуляції або до повної втрати здатності підтримувати стабільний тепловий баланс.

Саме тому при проектуванні великогабаритних тераріумів необхідно передбачати не тільки обігрів, вентиляцію й теплообмін, але й просторову структуру потоків, можливість утворення застійних зон, вертикальної стратифікації температури, розподіл швидкостей у різних функціональних областях. За відсутності реального експериментального майданчика, чисельні методи – зокрема обчислювальна гідродинаміка (CFD) – дають змогу оцінити якість мікроклімату ще до фактичного створення об'єкта.

У цьому дослідженні проведено CFD-моделювання великого закритого простору розмірами 8×8×4 м, призначеного для утримання *Rousettus aegyptiacus*. Метою роботи є побудова детальної 3D-картини розподілу швидкостей і температур, аналіз поведінки потоків повітря за різних варіантів вентиляційних отворів та оцінка відповідності отриманих параметрів біологічним потребам виду тварин.

ПАРАМЕТРИ СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ УТРИМАННЯ КАЖАНА ВИДУ *ROUSETTUS AEGYPTIACUS*

Єгипетський фруктовий кажан походить з регіонів, де температурний режим є стабільним упродовж доби та року, а середовище вирізняється відсутністю різких повітряних потоків. Одним із ключових факторів є температура – оптимальною вважається зона від 25 до 26 °С, із допустимими межами 22–28 °С. Важливо підкреслити, що *R. aegyptiacus* демонструє низьку терпимість до різких змін: добові коливання не повинні перевищувати ± 2 °С.

Вологість середовища також відіграє критичну роль у терморегуляції, оскільки кажани чутливі до пересихання шкіри та верхніх дихальних шляхів. Рекомендований діапазон вологості становить 55-75 %. У зонах активності – польотних коридорах, місцях харчування – повітря має зберігати спокійну структуру, без інтенсивних турбулентних збурень.

Окремо слід визначити допустимі швидкості повітря: у місцях відпочинку тварин швидкість не повинна перевищувати 0.3 м/с, оптимально – 0.05–0.15 м/с. Перевищення цих значень може спричинити надмірні втрати тепла та призвести до переохолодження. Повітрообмін у великих приміщеннях підтримується на рівні 6–10 АСН [2], що забезпечує видалення CO₂ та надлишків вологи, але при цьому не руйнує комфортні температурні поля.

У великих просторах, таких як розглянутий тераріум, неминуче формується вертикальна стратифікація: верхні шари повітря тепліші, нижні – холодніші. Завдання системи мікроклімату полягає не в усуненні цього ефекту, а у забезпеченні його передбачуваності та плавності переходу температури між різними рівнями.

МЕТОДОЛОГІЯ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Для аналізу поведінки повітряних потоків у потенційному тераріумі було побудовано тривимірну модель розмірами 8×8×4 м (об'єм 256 м³). Геометрія включала один припливний отвір, один витяжний отвір та один панельний електричний нагрівач. Розміри отворів розглядалися у двох варіантах: 1 м × 1 м та 0.65 м × 0.65 м.

Сітку створено з використанням поліедральних елементів та локального згущення навколо отворів і нагрівача. Було застосовано інфляційні шари для відтворення прикордонного шару. Загальна кількість клітинок становила близько 93,000 тисяч.

Моделювання виконано у ANSYS Fluent [3] з використанням моделі турбулентності k-omega SST. Повітря розглядалося як ідеальний газ із температурною залежністю густини. Швидкість на припливному отворі визначалася на основі поетапного розрахунку необхідної інтенсивності

повітрообміну. Для вхідного отвору площа складає 1 м^2 . Для тераріуму об'ємом 256 м^3 при вимозі 8 АСН потрібна загальна витрата повітря:

$$Q = АСН \cdot V = 8 \cdot 256 = 2048\text{ м}^3/\text{год.} \quad (1)$$

Переведемо у секунди:

$$Q_{\text{сек}} = \frac{2048}{3600} \approx 0.5689\text{ м}^3/\text{с.} \quad (2)$$

Звідси розраховуємо швидкість:

$$v = \frac{0.5689}{1} \approx 0.57\text{ м/с.} \quad (3)$$

Отримані значення використовувалися у межах граничних умов CFD-моделі.

Аналіз результатів проводився на горизонтальних зрізах із кроком 0.5 м по висоті, що дозволило оцінити стратифікацію температури та характер руху повітря.

РЕЗУЛЬТАТИ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

Результати чисельного моделювання демонструють високу однорідність температури на кожному з горизонтальних зрізів тераріуму. Значення по площині відрізняються мінімально – не більше ніж на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Така рівномірність вказує на ефективне змішування повітря завдяки великим розмірам приміщення та правильно організованій вентиляції.

У вертикальному напрямку спостерігається чітко виражений температурний градієнт: нижні рівні залишаються холоднішими, а температура зростає по мірі підйому. Це відповідає природним законам конвекції та впливу локального джерела тепла.

Поля швидкості показують, що найбільші швидкості локалізовані у невеликій зоні поблизу припливного отвору, де формується спрямований струмінь. У центральній частині приміщення швидкість стабільно знижується до значень $0.02\text{--}0.08\text{ м/с}$, що повністю відповідає вимогам для утримання кажанів виду *Rousettus aegyptiacus*.

На рис. 1 та рис. 2 зображено поверхні температури та швидкості повітряного потоку на висоті 1 м :



Рисунок 1. Контурна поверхня температури на висоті 1 м

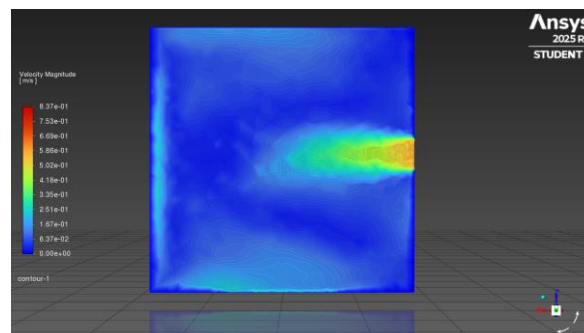


Рисунок 2. Контурна поверхня швидкості повітря на висоті 1 м

На рис. 3 та рис. 4 зображено поверхні температури та швидкості повітряного потоку на висоті 2 м:

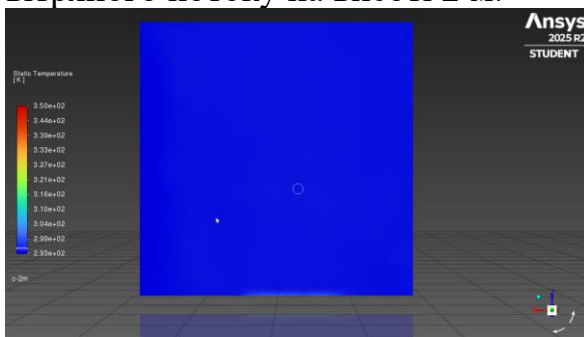


Рисунок 3. Контурна поверхня температури на висоті 2 м

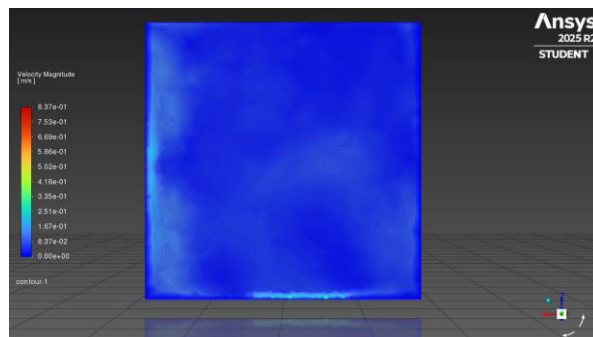


Рисунок 4. Контурна поверхня швидкості повітря на висоті 2 м

На рис. 5 та рис. 6 зображено поверхні температури та швидкості повітряного потоку на висоті 3 м:

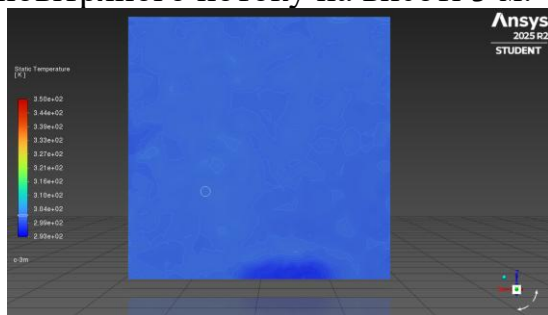


Рисунок 5. Контурна поверхня температури на висоті 3 м

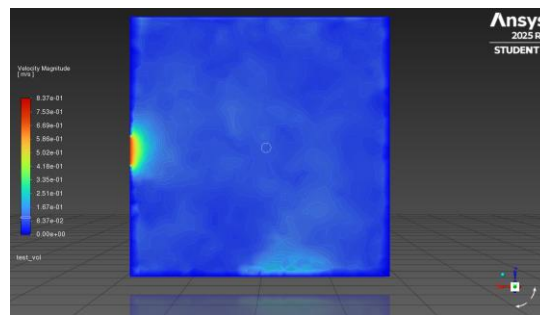


Рисунок 6. Контурна поверхня швидкості повітря на висоті 3 м

ВИСНОВКИ

Проведене CFD-моделювання дозволило отримати детальну просторову картину розподілу температури та швидкості повітря у тераріумі великого об'єму. Аналіз показав, що:

1. Температура на кожному горизонтальному рівні є майже однорідною, що підтверджує ефективне перемішування повітря в межах площини.
2. У вертикальному напрямку формується природний градієнт температури, характерний для великих приміщень та підсилений дією джерела нагріву.
3. Значення швидкості у житлових зонах залишаються в межах 0.02–0.08 м/с, що відповідає біологічним потребам виду кажанів *Rousettus aegyptiacus*.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] *Rousettus aegyptiacus* – Egyptian Fruit Bat. — Режим доступу:

https://ewt.org/wp-content/uploads/2022/11/52.-Egyptian-Fruit-Bat-Rousettus-aegyptiacus_LC.pdf — 19.10.2025 р.

[2] The Captive Environment for Old World Fruit Bats — Режим доступу: https://www.battag.org/uploads/6/2/7/6/6276216/paper_-_the_captive_environment_for_old_world_fruit_bats.pdf — 19.10.2025 р.

[3] ANSYS Fluent [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ansys.soften.com.ua/products/fluids/ansys-fluent.html>

Науковий керівник – д.т.н, проф. С.В. Барилко