

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

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

на тему: «Автоматизована система збору та аналізу даних про параметри довкілля з використанням безпілотного літального апарата»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПК-41мп

Косінська Анна Андріївна _____

Керівник:

доцент

Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з розробки стартап-проектів:

д.е.н., проф. професор кафедри

економічної кібернетики

Вовк Ольга Миколаївна _____

Рецензент:

професор каф. КІТВП, д.т.н.

Антонюк Віктор Степанович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті 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 автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Косінська Анна Андріївна

1. Тема дисертації «Автоматизована система збору та аналізу даних про параметри довкілля з використанням безпілотного літального апарата», науковий керівник дисертації Богдан Галина Анатоліївна, доцент, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2015 р. №4793-с.
2. Термін подання студентом проєкту 16.12.2025.
3. Об'єкт дослідження : процес збору та аналізу параметрів довкілля автоматизованою системою з використанням безпілотного літального апарата та датчиків на борту для контролю і обробки отриманих даних.
4. Вихідні дані : система для моніторингу за допомогою безпілотного літального апарата.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: виконати комплекс завдань, пов'язаних з розробленням та моделюванням автоматизованої системи збору й аналізу екологічних даних на базі БПЛА. Провести аналіз сучасних підходів до екологічного моніторингу, технічних рішень та вимог до мобільних систем, визначити архітектуру системи та обґрунтувати вибір сенсорного комплексу. Створити візуальну та конструктивну 3D-модель БПЛА у Blender. Описати математичну модель руху дрона з урахуванням впливу вітру, проходження контрольних точок і обмежень по швидкості та висоті. Реалізувати симуляції різних траєкторій у MATLAB/Simulink.

Змодельовати роботу сенсорів, включаючи шум, систематичні похибки, вібрації, затримки та пропуски даних. Змодельовати канал зв'язку між БПЛА та наземною станцією, врахувати втрати пакетів, шумові завади та затримки при передачі. Розробити алгоритми фільтрації, інтерполяції та просторової візуалізації результатів, побудову теплових карт і оцінку впливу завад на точність вимірювань.

6.Орієнтований перелік графічного ілюстративного матеріалу: Схема архітектури автоматизованих систем збору та аналізу даних, загальний процес просторової локалізації даних з БПЛА, структурна схема автоматизованої системи збору та аналізу даних, блок-схема алгоритму збору, обробки та збереження даних, складові FPV-дрона, графіки, загальний плакат.

7. Орієнтований перелік публікацій: Косінська А. А. «АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЗБОРУ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ ПРО ПАРАМЕТРИ ДОВКІЛЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА» XXI Науково-практична конференція «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні».

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Завідувач кафедри економічної кібернетики, Доктор економічних наук, професор Бояринова Катерина Олександрівна		

9. Дата видачі завдання 01.09.2025.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	06.09.2025	
2	Проведення аналітичного огляду	16.09.2025	
3	Розрахунок параметрів	03.10.2025	
4	Підбір компонентів	15.10.2025	
5	Розробка схем	06.11.2025	
6	Розробка стартап-проєкту	17.11.2025	
7	Здача диплому на перевірку керівнику	25.11.2025	

Студент

Анна КОСІНСЬКА

Керівник

Галина БОГДАН

РЕФЕРАТ

Актуальність теми

Тема магістерської дисертації є актуальною у зв'язку з серйозністю сучасних екологічних викликів та технологічних процесів у сфері моніторингу мікроклімату довкілля. Інтенсифікація антропогенного впливу, зміна клімату та збільшення частоти природних і техногенних надзвичайних ситуацій вимагають зовсім нових підходів до моніторингу. Методи, які вже давно існують, такі як мережа стаціонарних постів або супутникове дистанційне зондування, мають значні обмеження. Наприклад, перші забезпечують лише точкові вимірювання, в той час, як другі часто страждають від недостатньої просторової роздільної здатності, високої вартості та залежності від атмосферних умов.

У даному контексті використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкриває нові можливості для моніторингу навколишнього середовища. БПЛА поєднують у собі високу мобільність, здатність отримувати дані з надзвичайно високою роздільною здатністю та працювати в режимі реального часу на важкодоступних або небезпечних територіях. Проте, ефективне використання технології БПЛА неможливе без подолання головного обмеження – рутинної та трудомісткої обробки величезних обсягів зібраної інформації.

Саме тому, розробка цілісної автоматизованої системи, яка інтегрує планування місій, збір даних та їх подальший інтелектуальний аналіз з використанням сучасних алгоритмів, має виняткове наукове та практичне значення. Така система дозволяє перейти від пасивної фіксації параметрів до надзвичайно активного управління екологічною безпекою, що повністю відповідає концепції «розумного середовища» та завданням сталого розвитку цифрової економіки. Реалізація цього завдання не тільки підвищить ефективність заходів з охорони навколишнього середовища, а й виведе на новий рівень якість прийняття управлінських рішень.

Мета і задачі дослідження

Мета дослідження – розробити автоматизовану систему моніторингу навколишнього середовища на основі безпілотних літальних апаратів(БПЛА) для підвищення ефективності збору та аналізу екологічних даних.

Основні завдання:

- 1) Проаналізувати існуючі методи, засоби моніторингу та апаратні та програмні рішення(БПЛА, датчики, програмне забезпечення), визнавши їх переваги та недоліки.
- 2) Обґрунтувати та обрати апаратні та програмні компоненти для системи.
- 3) Розробити архітектуру автоматизованої системи, включаючи підсистеми планування польотів, збору, обробки та аналізу даних.
- 4) Розробити або адаптувати алгоритми для автоматизованого аналізу даних(виявлення забруднення, оцінка рослинності, побудова 3D-моделей).
- 5) Впровадити методи зв'язування геопросторових даних.
- 6) Провести експериментальне тестування системи, оцінити її ефективність за критеріями точності ,швидкості та енергоефективності.

Об'єкт дослідження – процес збору та аналізу параметрів довкілля автоматизованою системою з використанням безпілотного літального апарата та датчиків на борту для контролю і обробки отриманих даних.

Предмет дослідження – система для моніторингу за допомогою безпілотного літального апарата.

Методи дослідження

У роботі використовувався набір методів, які можна об'єднати в групи:

- 1) Теоретичні та аналітичні:
 - Аналіз, синтез та системний підхід до вивчення існуючих рішень, формування мети та архітектури системи.
 - Математичне моделювання для опису процесів збору, передачі та обробки даних.
- 2) Емпіричні (експериментальні):
 - Повномасштабний експеримент, спостереження та вимірювання для тестування системи в реальних умовах та збору первинних даних за допомогою датчиків БПЛА.
- 3) Методи обробки та аналізу даних:
 - Методи географічної інформації (ГІС): для просторової орієнтації, візуалізації та картографування.

- Методи дистанційного зондування та фотограмметрії: для створення ортофотокарт, 3D-моделей рельєфу та інших продуктів на основі зображень.
- Статистичний аналіз: для виявлення закономірностей та оцінки надійності результатів.
- Цифрова фільтрація: для усунення шуму та помилок в вихідних даних.
- Методи машинного навчання та комп'ютерного зору (нейронні мережі): для автоматичної класифікації об'єктів, виявлення аномалій та розпізнавання закономірностей.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Запропоновано вдосконалену архітектуру автоматизованої системи моніторингу на основі БПЛА. Її основною відмінністю є комплексна інтеграція підсистем планування польотів, збору даних з різних типів датчиків та їх аналізу в режимі, близькому до реального часу, в єдиному комплексі.

2. Методологія цифрової обробки сигналів вдосконалена, запропоновано підхід до автоматичної оцінки якості даних з використанням адаптивних фільтрів, що забезпечило підвищення точності вимірювань параметрів навколишнього середовища.

3. Розроблено алгоритм інтеграції даних з різних сенсорних модулів з геопросторовими координатами, що дозволило створити більш точні картографічні моделі стану навколишнього середовища.

Практичне значення результатів дисертації

Практичне значення дослідження полягає в тому, що розроблена автоматизована система може бути використана як ефективний інструмент для моніторингу навколишнього середовища. Використання безпілотного літального апарата забезпечує своєчасний збір даних про стан повітря, ґрунту та водних об'єктів, що дозволяє своєчасно виявляти зміни екологічних параметрів, зони забруднення або можливі незаконні скиди відходів.

Система також може бути використана для оцінки стану сільськогосподарських угідь та підтримки прийняття рішень у сфері охорони навколишнього середовища та

раціонального використання природи. Використання таких технологій допомагає зменшити витрати на польові дослідження, підвищити точність просторового аналізу та ефективність отримання результатів.

Результати, отримані в рамках дисертації, можуть бути впроваджені в роботу науково-дослідних організацій, державних екологічних структур, а також у комерційні проекти, пов'язані з аероекологічним моніторингом. Це підтверджує практичну цінність розробки та її перспективи для подальшого використання та розвитку.

Ключові слова

Автоматизована система, моніторинг, безпілотний літальний апарат, навколишнє середовище, обробка даних.

ABSTRACT

Relevance of the topic

The topic of the master's thesis is relevant due to the seriousness of modern environmental challenges and technological processes in the field of environmental microclimate monitoring. Intensification of anthropogenic impact, climate change and an increase in the frequency of natural and man-made emergencies require completely new approaches to monitoring. Methods that have existed for a long time, such as a network of stationary posts or satellite remote sensing, have significant limitations. For example, the former provide only point measurements, while the latter often suffer from insufficient spatial resolution, high cost and dependence on atmospheric conditions.

In this context, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) opens up new opportunities for environmental monitoring. UAVs combine high mobility, the ability to receive data with extremely high resolution and operate in real time in hard-to-reach or dangerous areas. However, the effective use of UAV technology is impossible without overcoming the main limitation - the routine and labor-intensive processing of huge volumes of collected information.

That is why the development of a holistic automated system that integrates mission planning, data collection and their subsequent intelligent analysis using modern algorithms is of exceptional scientific and practical importance. Such a system allows you to move from passive fixation of parameters to extremely active environmental safety management, which fully corresponds to the concept of "smart environment" and the tasks of sustainable development of the digital economy. The implementation of this task will not only increase the effectiveness of environmental protection measures, but also bring the quality of managerial decision-making to a new level.

Purpose and objectives of the study

The purpose of the study is to develop an automated environmental monitoring system based on unmanned aerial vehicles (UAVs) to increase the efficiency of environmental data collection and analysis.

Main tasks:

- 1) Analyze existing methods, monitoring tools and hardware and software solutions (UAVs, sensors, software), recognizing their advantages and disadvantages.
- 2) Substantiate and select hardware and software components for the system.
- 3) Develop the architecture of an automated system, including subsystems for flight planning, data collection, processing and analysis.
- 4) Develop or adapt algorithms for automated data analysis (pollution detection, vegetation assessment, construction of 3D models).
- 5) Implement methods for linking geospatial data.
- 6) Conduct experimental testing of the system, evaluate its effectiveness according to the criteria of accuracy, speed and energy efficiency.

The object of research is the process of collecting and analyzing environmental parameters by an automated system using an unmanned aerial vehicle and sensors on board to control and process the data obtained.

The subject of the study is a system for monitoring using an unmanned aerial vehicle.

Research methods

The work used a set of methods that can be combined into groups:

- 1) Theoretical and analytical:
 - Analysis, synthesis and a systematic approach to studying existing solutions, forming the goal and architecture of the system.
 - Mathematical modeling to describe the processes of data collection, transmission and processing.
- 2) Empirical (experimental):
 - Full-scale experiment, observations and measurements to test the system in real conditions and collect primary data using UAV sensors.
- 3) Data processing and analysis methods:
 - Geographic information systems (GIS): for spatial orientation, visualization and mapping.
 - Remote sensing and photogrammetry methods: for creating orthophoto maps, 3D terrain models and other products based on images.
 - Statistical analysis: to identify patterns and assess the reliability of the results.

- Digital filtering: to eliminate noise and errors in the original data.
- Machine learning and computer vision methods (neural networks): for automatic classification of objects, detection of anomalies and recognition of patterns.

Scientific novelty of the results

The scientific novelty of the work is as follows:

1. An improved architecture of an automated monitoring system based on UAVs is proposed. Its main difference is the complex integration of flight planning subsystems, data collection from different types of sensors and their analysis in a mode close to real time, in a single complex.

2. The methodology of digital signal processing is improved, an approach to automatic data quality assessment using adaptive filters is proposed, which ensured an increase in the accuracy of measurements of environmental parameters.

3. An algorithm for integrating data from various sensor modules with geospatial coordinates is developed, which allowed creating more accurate cartographic models of the state of the environment.

Practical significance of the dissertation results

The practical significance of the research is that the developed automated system can be used as an effective tool for environmental monitoring. The use of an unmanned aerial vehicle provides timely collection of data on the state of air, soil and water bodies, which allows for timely detection of changes in environmental parameters, pollution zones or possible illegal waste discharges.

The system can also be used to assess the state of agricultural land and support decision-making in the field of environmental protection and rational use of nature. The use of such technologies helps to reduce the cost of field research, increase the accuracy of spatial analysis and the efficiency of obtaining results.

The results obtained within the framework of the dissertation can be implemented in the work of scientific research organizations, state environmental structures, as well as in commercial projects related to aeroecological monitoring. This confirms the practical value of the development and its prospects for further use and development.

Keywords

Automated system, monitoring, unmanned aerial vehicle, environment, data processing.

Вступ

Сучасний стан навколишнього середовища все більше привертає увагу вчених, державних органів та громадськості. Забруднення повітря, погіршення якості води, деградація ґрунтів, збільшення кількості екологічних надзвичайних ситуацій – все це створює значні ризики для здоров'я людини та збереження природних екосистем. З огляду на темпи урбанізації та промислового розвитку, на перший план виходить питання оперативного моніторингу навколишнього середовища.

Традиційні підходи до моніторингу екологічного стану територій зазвичай передбачають ручний збір даних за допомогою стаціонарного обладнання. Такі методи часто є повільними, вимагають великих витрат і людських ресурсів. Крім того, вони не завжди здатні забезпечити достатню точність або повноту даних, особливо коли мова йде про важкодоступні райони, небезпечні зони або великі території, що вимагають систематичного контролю.

У світлі розвитку сучасних технологій особливого значення набувають цифрові та автоматизовані рішення, що дозволяють оптимізувати процеси моніторингу. Впровадження безпілотних літальних апаратів відкриває нові можливості в області моніторингу навколишнього середовища. За допомогою БПЛА можна швидко проводити обстеження територій, оперативно виявляти проблемні ділянки, отримувати фотографії та дані датчиків з високою точністю і прив'язкою до координат.

Такі технології активно використовуються в багатьох країнах світу, де екологічна аналітика є частиною національної безпеки та стратегічного планування. Україна також зацікавлена у впровадженні інновацій у сфері охорони природи, оскільки на її території знаходяться численні промислові об'єкти, природоохоронні зони, сільськогосподарські угіддя, які потребують постійного моніторингу. Питання моніторингу стало особливо актуальним в останні роки через погіршення екологічної ситуації в результаті війни, руйнування промислової інфраструктури, забруднення ґрунтів і водойм.

Автоматизація процесів збору екологічної інформації дозволяє не тільки зробити цей процес більш ефективним, але й зменшити ризики для людей. Наприклад,

під час контролю територій техногенного забруднення або ліквідації наслідків аварій. Результати моніторингу, отримані за допомогою БПЛА, можуть бути негайно оброблені спеціальним програмним забезпеченням, що дозволяє швидко оцінити загальний стан території та виявити потенційні загрози.

Крім того, сучасні інформаційні технології дозволяють інтегрувати зібрані дані в геоінформаційні системи, що забезпечує наочність, простоту аналізу, можливість довгострокового зберігання та порівняння показників у динаміці. Таким чином, автоматизовані системи моніторингу стають важливим компонентом цифрової екології та формування інтелектуального середовища для взаємодії людини з природою.

В цілому, впровадження БПЛА в екологічні дослідження є логічним і прогресивним кроком, що поєднує сучасну авіоніку, сенсорні технології, геоаналітику та методи комп'ютерної обробки даних. Цей напрямок має значний потенціал для подальшого розвитку та модернізації, що робить його актуальним як у науковому, так і в практичному аспектах.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	8
Вступ.....	12
Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ	16
1.1. Автоматизовані системи моніторингу довкілля: підходи та класифікація.....	16
1.1.1. Ключові завдання АСМД.....	16
1.1.2. Класифікація систем моніторингу	17
1.2. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у моніторингу навколишнього середовища	23
1.2.1. Переваги використання БПЛА	23
1.2.2. Основні типи БПЛА та їхнє застосування.....	24
1.2.3. Методи збору та обробки даних	25
1.2.4. Приклади практичного застосування.....	27
1.2.5. Переваги БПЛА для екологічного моніторингу	29
1.2.6. Загальна структура екологічного моніторингу з БПЛА	30
1.3. Сенсорні технології для збору екологічних даних (температура, вологість, газові датчики, пил, радіація тощо).....	32
1.4. Сучасні програмні засоби аналізу даних у сфері екологічного моніторингу...	34
1.5. Постановка завдання дослідження	35
Висновок	37
Розділ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	39
2.1. Архітектура автоматизованих систем збору та аналізу даних	39
2.2. Математичні моделі збору та обробки екологічних даних.....	41
2.3. Методи фільтрації, агрегації та передачі даних з БПЛА	42
2.4. Методи просторової локалізації та прив'язки даних до координат	44
2.5. Вибір критеріїв ефективності системи	47
Висновок	48
Розділ 3. ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	50
3.1. Загальна структура системи (БПЛА, сенсори, комунікаційні модулі, наземна станція)	50
3.2. Вибір та обґрунтування сенсорів для моніторингу довкілля	53

3.3. Структурна схема автоматизованої системи на основі БПЛА	61
3.3. Проектування каналу передачі даних (радіоканал, Wi-Fi, LTE, LoRa тощо) ...	64
3.5. Алгоритм збору, обробки та збереження даних	67
3.6. Системне та прикладне програмне забезпечення (інтерфейс користувача, база даних, візуалізація результатів)	70
Висновок	72
4. МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ПРОЦЕСІВ	
МОНІТОРИНГУ	73
4.1. Постановка задачі моделювання	73
4.2. Вибір середовища та інструментів для моделювання	76
4.3. Математична модель руху БПЛА при виконанні місії моніторингу	81
4.3. Моделювання збору даних із сенсорів (похибки, завади, дискретність, затримки)	87
4.5. Імітація процесу передачі даних між БПЛА та наземною станцією	92
4.6. Алгоритми обробки та візуалізації результатів (фільтрація, інтерполяція, відображення на карті)	94
4.7. Аналіз результатів моделювання та їх використання для вдосконалення системи	97
Розділ 5. Розробка стартап проєктів «Автоматизована система збору та аналізу даних про параметри довкілля з використанням безпілотного літального апарата»	102
5.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту	102
5.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	105
5.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту	108
5.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проєкту та оцінювання його економічної ефективності	119
5.5. Висновок	131
Висновок	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	134

Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Автоматизовані системи моніторингу довкілля: підходи та класифікація

У сучасних умовах, коли темпи індустріалізації постійно зростають, а міста продовжують розширюватися, питання контролю стану довкілля стає не просто актуальним, а критично важливим для безпеки та якості життя людей. Своєчасний екологічний моніторинг дозволяє не лише виявляти потенційні загрози, а й ефективно реагувати на них, оцінювати дотримання екологічних норм та забезпечувати захист здоров'я населення.[1;2] Для цього необхідно мати достовірні, оперативні та добре структуровані дані про стан навколишнього середовища.

1.1.1. Ключові завдання АСМД

Основним призначенням будь-якої автоматизованої системи моніторингу довкілля є забезпечення інформаційної підтримки процесів управління екологічною безпекою та якістю навколишнього середовища. Щоб дана мета була досягнута, система виконує низку взаємопов'язаних завдань[3], кожне з яких займає своє місце в загальному циклі екологічного контролю.

1. Збір первинної інформації (спостереження)

На цьому етапі здійснюється регулярне або безперервне вимірювання визначеного набору параметрів довкілля. До них належать фізичні величини (температура, вологість, рівень шуму), хімічні показники (концентрації газів і забруднюючих речовин), біологічні індикатори, а також спеціалізовані параметри радіаційного фону.[2]

2. Перевірка відповідності нормативам (оцінка стану)

Після отримання первинних даних система проводить їх порівняння з нормативами, стандартами та еталонними величинами. Це дозволяє визначити, чи перевищені гранично допустимі концентрації (ГДК), чи зафіксовані відхилення від природного фону, а також оцінити рівень потенційної небезпеки для населення та довкілля.[1]

3. Аналітична обробка та моделювання процесів

На цьому етапі дані піддаються детальнішій обробці: встановлюються кореляційні зв'язки між різними факторами (наприклад, між погодними умовами та зміною рівня забруднення), аналізуються часові ряди для відстеження змін, а також виявляються тренди. Найбільш складним, але й найціннішим аспектом є прогнозування - побудова моделей[3;4], що дозволяють передбачити подальший розвиток ситуації, наприклад, поширення забруднень у разі аварійного викиду.

4. Інформування та оперативне оповіщення

Фінальним етапом є передача обробленої інформації відповідним органам, службам або населенню. У випадку виявлення небезпечних рівнів забруднення система здатна автоматично формувати попередження чи сигнали тривоги, забезпечуючи швидке реагування на потенційні або реальні екологічні загрози.

1.1.2. Класифікація систем моніторингу

Сучасні системи моніторингу навколишнього середовища є складними багатофункціональними комплексами, які забезпечують збір, аналіз і передачу екологічних даних у режимі реального часу або з певною періодичністю.[3] Для зручності дослідження та впровадження таких систем їх класифікують за різними ознаками залежно від цілей, територіального охоплення, частоти оновлення даних та способів доступу до них(рис. 1.1).

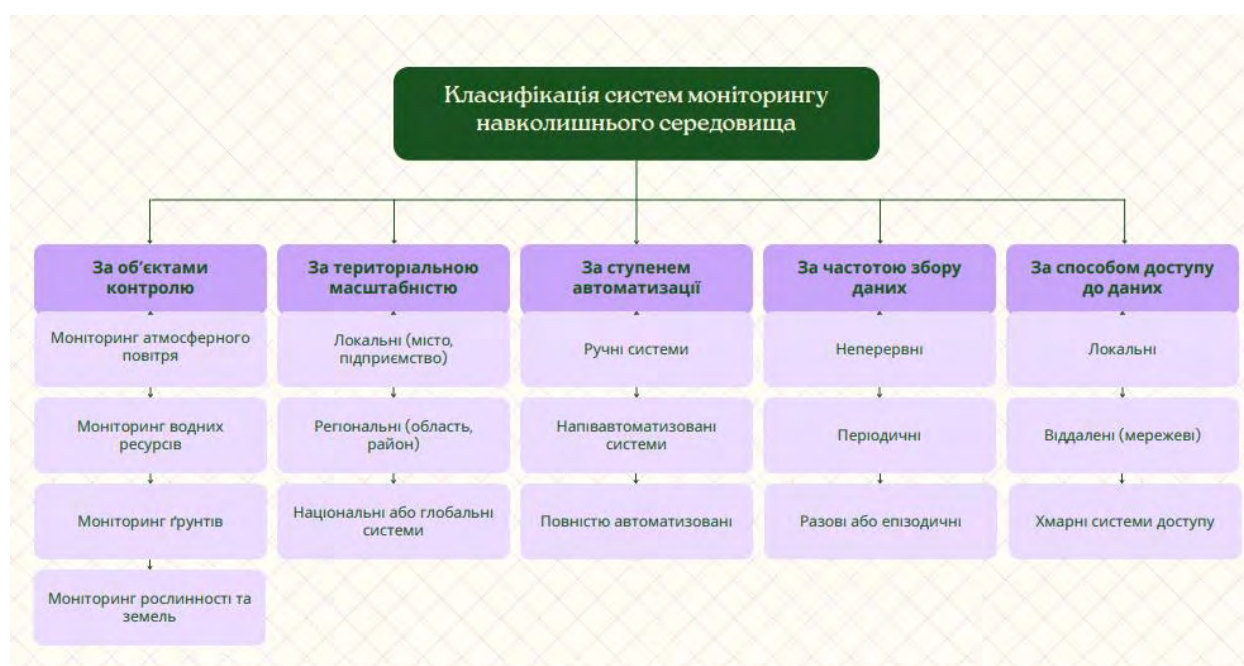


Рисунок 1.1 - Схема класифікації систем моніторингу навколишнього середовища

Класифікація за об'єктами контролю

Одним із ключових підходів до класифікації систем екологічного моніторингу є поділ за типом об'єкта довкілля, на який спрямоване спостереження. Об'єкти можуть включати природні компоненти біосфери або території з інтенсивним антропогенним впливом. Виділяють кілька основних груп об'єктів, для яких здійснюється моніторинг.

Моніторинг атмосферного повітря

Включає вимірювання концентрацій шкідливих речовин (PM2.5, PM10, SO₂, NO_x, O₃, CO, леткі органічні сполуки) та супутніх метеопоказників (температура, вологість, швидкість вітру). Актуальний для урбанізованих і промислових зон для контролю забруднення.[7]

Моніторинг водних ресурсів

Охоплює природні та штучні водойми, очисні споруди, водосховища, каналізаційні стоки. Контролюються рН, ОВП, ХСК/БСК, вміст важких металів, нафтопродуктів, мікробіологічні показники, температура. Мета - забезпечення безпеки водокористування та захист екосистем.

Моніторинг ґрунтів

Спрямований на оцінку стану та родючості ґрунтів, їх стійкості до деградації. Основні параметри: агрохімічні показники, забруднення важкими металами та пестицидами, гранулометрія, ерозія, засоленість, ущільнення. Використовується у сільському господарстві та техногенно навантажених регіонах.

Моніторинг рослинності та земельних ресурсів

Забезпечує оцінку стану рослинних угруповань і землекористування з використанням наземних сенсорів, супутникових знімків та даних БПЛА.[7] Завдання: виявлення змін у структурі та густоті рослинності, моніторинг лісових пожеж і незаконних вирубок, діагностика деградації земель, оцінка врожайності.

Класифікація систем моніторингу за територіальною масштабністю

Системи моніторингу довкілля можна класифікувати і за територіальною масштабністю(табл. 1.1) - тобто за тим, яку площу вони охоплюють. Такий підхід

допомагає зрозуміти, наскільки детально потрібно проводити вимірювання, які ресурси залучати та які методи збору й аналізу даних будуть найефективнішими для кожного рівня моніторингу.

Таблиця 1.1 Порівняння систем моніторингу за територіальною масштабністю

Рівень системи	Територія охоплення	Основні методи	Основні завдання
Локальні	Окрема ділянка, підприємство, квартал, мікрорайон	Точкові вимірювання сенсорами, портативні станції, БПЛА, пробовідбір	Виявлення локальних джерел забруднення, оперативний контроль стану повітря/води/грунтів
Регіональні	Місто, район, область	Стаціонарні пости моніторингу, мобільні лабораторії, супутникові дані на середній масштаб	Аналіз просторових тенденцій забруднення, оцінка впливу промислових зон, підтримка екологічної політики
Національні	Територія країни	Національні мережі постів, супутниковий моніторинг, геоінформаційні системи (GIS)	Формування державної екологічної стратегії, контроль виконання норм, оцінка загальнонаціональних ризиків
Глобальні	Весь світ	Супутникові програми (MODIS, Sentinel, Landsat), міжнародні мережі (GEO, GMES, WMO), океанографічні та атмосферні платформи	Узгоджена оцінка транскордонних процесів, відстеження глобальних змін клімату та довкілля, формування міжнародної екологічної політики

Можна зробити висновки, що системи екологічного моніторингу різняться за масштабом, методами збору даних і призначенням. Локальні системи дають детальний контроль невеликих територій, регіональні та національні охоплюють ширші простори та дозволяють оцінювати загальні тенденції, а глобальні базуються на супутникових мережах і дають змогу стежити за світовими екологічними процесами. Кожен рівень доповнює інші, формуючи цілісне бачення стану довкілля.

Класифікація систем моніторингу за ступенем автоматизації

Ступінь автоматизації в системах екологічного моніторингу визначає, наскільки процеси збору, обробки, аналізу та передавання даних можуть виконуватися без прямої участі людини. Від рівня автоматизації залежать оперативність отримання інформації, точність вимірювань та можливість своєчасного реагування на зміни у стані довкілля. Відповідно до цього критерію системи моніторингу традиційно поділяють на три основні групи(табл. 1.2):

Таблиця 1.2. Порівняння систем моніторингу за ступенем автоматизації

Тип системи	Рівень автоматизації	Основні операції	Переваги	Недоліки
Ручні	Мінімальний або відсутній	Відбір проб ґрунту, води, повітря; польові спостереження; вимірювання портативними приладами	Можливість проведення специфічних лабораторних аналізів, недоступних автоматичним датчикам	Низька оперативність; вплив людського фактору; велика трудомісткість; обмежена частота вимірювань
Напівавтоматизовані	Частковий	Автоматичне вимірювання, попередня обробка даних, передача інформації; участь людини у налаштуванні та інтерпретації	Оптимальне поєднання оперативності і точності; зменшене навантаження на персонал; контроль якості даних	Часткова залежність від людини; потреба у перевірці та обслуговуванні; можливі помилки при інтерпретації
Повністю автоматизовані	Повний	Безперервний збір, обробка, аналіз і передача даних; автоматичні попередження	Мінімальний людський фактор; безперервний моніторинг; інтеграція з інформаційними системами; можливість прогнозування	Висока вартість обладнання; складність технічного обслуговування; залежність від електроживлення і зв'язку; обмеження у специфічних лабораторних аналізах

По даним наведеним в табл. 1.2 можна зробити висновки:

1. Ручні системи залишаються важливими для проведення специфічних аналізів, які неможливо автоматизувати. Вони забезпечують високу точність у вузьких задачах, проте мають низьку оперативність і високу трудомісткість, а також схильні до впливу людського фактору.
2. Напівавтоматизовані системи поєднують переваги ручного та автоматичного контролю. Вони забезпечують оптимальний баланс між точністю вимірювань і швидкістю збору даних, зменшують навантаження на персонал та дозволяють контролювати якість даних. Недоліком залишається часткова залежність від оператора і потреба у регулярному обслуговуванні.
3. Повністю автоматизовані системи є найбільш ефективними для безперервного моніторингу. Вони мінімізують людський фактор, забезпечують високу оперативність та інтеграцію з інформаційними платформами, а також

відкривають можливості для прогнозування екологічних процесів. Основні обмеження - висока вартість, складність обслуговування та залежність від стабільності електроживлення і зв'язку.

4. Загальна тенденція: із підвищенням рівня автоматизації збільшується оперативність збору та обробки даних, зменшується вплив людського фактору, проте зростають вимоги до фінансування, технічного обслуговування та інфраструктури. Вибір типу системи моніторингу повинен базуватися на конкретних завданнях, масштабі території та доступних ресурсах.

Класифікація систем моніторингу за частотою збору даних

Частота збору даних є важливим показником у роботі систем екологічного моніторингу, адже саме вона визначає, як часто оновлюється інформація про стан довкілля (табл. 1.3). Від регулярності вимірювань залежить можливість швидкого реагування на зміни у контрольованому середовищі та загальна ефективність системи.

Таблиця 1.3. Порівняння систем моніторингу за частотою збору даних

Тип системи	Частота збору даних	Характеристика	Переваги	Недоліки
Неперервні системи	Збір даних у реальному часі, безперервний	Дані фіксуються постійно за допомогою автоматизованих сенсорів і передаються на сервер чи станцію.	Висока точність, оперативність, можливість швидко реагувати на зміни.	Висока вартість обладнання, потреба в енергії та інфраструктурі
Періодичні системи	Через визначені інтервали (години, дні, тижні, місяці)	Вимірювання виконуються регулярно за заданим графіком, як вручну, так і за допомогою технічних засобів.	Оптимальний баланс між витратами та інформативністю, зручність планування.	Менша оперативність, можливі пропуски короточасних змін у середовищі.
Разові епізодичні системи	Збір даних відбувається лише за потреби	Використовуються для разових досліджень, аварійних ситуацій або спеціальних експедицій.	Низькі витрати, можливість застосування у складних або віддалених умовах.	Немає інформації про динаміку процесів, результати залежать від моменту вимірювання.

На основі наведеної табл. 1.3 можемо зробити висновок, що частота збору даних суттєво впливає на можливості та призначення систем моніторингу. Неперервні системи забезпечують найвищу оперативність і дозволяють стежити за

змiнами в режимi реального часу, тодi як перiодичнi системи пропонують збалансований пiдхiд мiж точнiстю та витратами. Разовi або епiзодичнi вимiрювання використовуються тодi, коли потрiбна оцiнка стану довкiлля в окремий момент або пiд час надзвичайних ситуацiй.

Класифiкацiя систем монiторингу за способом доступу до даних

Спосiб доступу до даних визначає, яким чином користувач або сама система отримує iнформацiю вiд монiторингового обладнання, а також показує рiвень технологiчної iнтеграцiї мiж засобами збору та передавання даних(табл. 1.4). Вiд цього параметра залежить швидкiсть реагування, зручнiсть роботи з iнформацiєю та можливостi оперативного управлiння екологiчними процесами.

Таблиця 1.4. Порiвняння систем монiторингу за способом доступу до даних

Тип системи	Спосiб доступу до даних	Характеристика	Переваги	Недолiки
Локальнi системи	Доступ лише на мiсцi встановлення	Данi зберiгаються безпосередньо на пристрої або локальному комп'ютерi.	Висока безпека, незалежнiсть вiд iнтернету, простота експлуатацiї.	Обмежена доступнiсть, складнiсть збирання великих обсягiв даних.
Вiддаленi (мережевi) системи	Доступ через локальну мережу або iнтернет	Данi передаються на вiддалений сервер або станцiю через мережеве пiдключення.	Оперативнiсть, можливiсть дистанцiйного контролю, доступ кiлькох користувачiв.	Залежнiсть вiд якостi зв'язку, потреба в мережевiй iнфраструктурi.
Хмарнi системи	Доступ через онлайн-платформи (cloud)	Данi зберiгаються у хмарних сервісах з можливiстю масштабування та аналітики.	Гнучкiсть, доступ з будь-якого мiсця, iнтеграцiя з аналітичними iнструментами.	Питання конфiденцiйностi, потреба у стабiльному iнтернет-пiдключеннi.

На основi наведеної табл. 1.4 можна зробити висновок, що способи доступу до даних визначають рiвень зручностi, мобiльностi та масштабованостi систем монiторингу. Локальнi системи забезпечують високу безпеку й автономнiсть, але обмежують доступнiсть iнформацiї. Вiддаленi мережевi системи дозволяють оперативно отримувати данi та керувати процесами дистанцiйно, проте залежать вiд якостi зв'язку. Хмарнi рiшення є найбільш гнучкими та функцiональними, забезпечуючи доступ iз будь-якого мiсця та можливiсть використання потужних

аналітичних інструментів, хоча потребують стабільного інтернету та мають питання щодо конфіденційності.

1.2. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у моніторингу навколишнього середовища

Традиційні підходи до моніторингу, зокрема проведення наземних спостережень або використання супутникових даних, часто не забезпечують необхідної деталізації та своєчасності. Вони можуть мати низку недоліків: високу вартість, обмежену просторову роздільність або значні затримки у надходженні інформації.

У такій ситуації дедалі більшої популярності набуває застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Завдяки своїй мобільності, гнучкості та можливості роботи у важкодоступних місцях БПЛА стають ефективним та перспективним інструментом для збору екологічних даних. Вони дозволяють отримувати точні, оперативні та високодетальні вимірювання, що робить їх невід'ємною частиною сучасних систем моніторингу довкілля.

1.2.1. Переваги використання БПЛА

Використання безпілотних літальних апаратів у сфері екологічного моніторингу має низку суттєвих переваг, які роблять їх одним із найбільш перспективних інструментів для збору даних про стан довкілля. Саме завдяки поєднанню мобільності, точності та технологічної гнучкості БПЛА здатні значно підвищити ефективність моніторингових систем (табл. 1.5).

Таблиця 1.5. Порівняння традиційних методів моніторингу та використання БПЛА для завдань екологічного моніторингу

Критерій	Спосіб доступу до даних	Характеристика
Доступ до територій	Обмежений, особливо у важкодоступних або небезпечних зонах (болота, промзони, лісові масиви).	Високий доступ, можливість охоплення важкодоступних, небезпечних або великих територій.
Швидкість збору даних	Повільна, потребує значних витрат часу та людських ресурсів.	Висока швидкість, оперативний обліт великих площ за короткий час.

Критерій	Спосіб доступу до даних	Характеристика
Вартість	Висока при великому обсязі польових робіт, потребує транспорту, персоналу, лабораторій.	Порівняно нижча при довгостроковому використанні; зниження витрат на персонал і логістику.
Точність та деталізація	Обмежена кількість точок вимірювань, низька просторово-часова роздільність.	Висока деталізація, можливість отримання даних з великою роздільністю та частотою.
Безпека персоналу	Потребує фізичної присутності на потенційно небезпечних об'єктах.	Мінімальна участь людини, зниження ризиків для здоров'я та безпеки.
Гнучкість та масштабованість	Складно адаптувати під різні задачі; необхідне переобладнання або нові інструменти.	Легко змінювати сенсори, налаштування та маршрути польоту під конкретну задачу.
Оперативність обробки даних	Дані часто потребують лабораторної обробки, що займає час.	Можлива обробка в реальному часі, автоматизоване передавання на станцію.
Екологічний вплив	Певний вплив через використання транспорту, важкого обладнання.	Мінімальний вплив, низька шумність і відсутність потреби в транспорті.

На основі проведеного порівняння можна підсумувати, що традиційні методи екологічного моніторингу залишаються важливою складовою системи спостережень, проте вони мають низку обмежень, пов'язаних із повільністю, складністю доступу до окремих територій та значними витратами на персонал і обладнання. БПЛА, навпаки, відкривають можливість оперативного та детального збору даних у реальному часі, забезпечуючи високу просторову роздільність і доступ до небезпечних чи важкодоступних зон без ризику для людей. Завдяки гнучкості у виборі сенсорів, швидкій зміні маршрутів та можливості автоматизованої обробки даних дрони значно підвищують ефективність моніторингових процесів. У сукупності це робить використання БПЛА не просто альтернативою, а сучасним інструментом, який дозволяє суттєво підсилити та доповнити традиційні методи, підвищуючи точність, оперативність і наукову цінність екологічних досліджень.

1.2.2. Основні типи БПЛА та їхнє застосування

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) розрізняються за конструкцією, способом польоту та функціональними можливостями. Кожен тип має свої переваги і використовується залежно від конкретних завдань у моніторингу навколишнього середовища. У практиці виділяють три основні групи БПЛА: мультироторні, фіксованокрилі та гібридні (VTOL), але розберемо й інші детальніше (табл. 1.5).

Таблиця 1.5. Типи безпілотних літальних апаратів

Тип БПЛА	Характеристика	Приклади застосування
Мультироторні (квадрокоптери, гексакоптери)	Вертикальний зліт і посадка; здатність зависати в повітрі; висока точність позиціонування; можливість роботи на малих висотах.	Вимірювання якості повітря у міських зонах; фотограмметрія та картування територій; інспекція промислових зон і потенційних джерел забруднення; моніторинг рослинності, лісів, парків; дослідження малих водойм і берегових зон.
Фіксованокрилі апарати (планери)	Високий час польоту (до кількох годин); можливість покривати значні площі за один політ; економне використання енергії; висока швидкість польоту.	Регіональний і національний моніторинг; спостереження за станом лісових масивів; моніторинг річок, водосховищ, прибережних зон; виявлення незаконних вирубок та пожеж; оцінювання стану сільськогосподарських угідь.
Гібридні (VTOL)	Вертикальний зліт та посадка; тривалий політ, як у фіксованокрилих дронів; можливість працювати у складних умовах; висока мобільність.	Моніторинг великих природних територій, де немає можливості облаштувати злітну смугу; комплексне картування земель; дослідження екосистем, розташованих у важкодоступних зонах.
Мікро- та нано-БПЛА	Мінімальна вага; можливість працювати у замкнутих просторах; низький рівень шуму; зручність транспортування.	Інспекція промислових приміщень та вентиляційних систем; моніторинг у складних ландшафтних умовах; дослідження невеликих ділянок ґрунтів чи рослинності.
БПЛА прив'язним кабелем (tethered UAV)	Майже необмежений час польоту; стабільний канал передачі даних; підвищена безпека експлуатації.	Моніторинг повітря поблизу промислових підприємств; спостереження за масовими заходами або аварійними зонами; міський екологічний контроль у режимі реального часу.

1.2.3. Методи збору та обробки даних

У системах екологічного моніторингу, особливо при використанні безпілотних літальних апаратів, надзвичайно важливо забезпечити коректний та якісний збір даних, а також їх подальшу обробку. Саме ці етапи визначають достовірність отриманих результатів і ефективність аналізу стану довкілля.

1. Методи збору даних

1.1. Прямі вимірювання сенсорами

Найпоширеніший спосіб збору інформації - це використання різних типів сенсорів, встановлених на БПЛА або на наземних станціях:

- датчики температури, вологості, атмосферного тиску;
- газові сенсори (CO_2 , CO , NO_x , SO_2 тощо);
- мульти- та гіперспектральні камери;
- лідари та тепловізори;
- фотограмметричні системи.

1.2. Дистанційне зондування

Дистанційні методи базуються на збиранні інформації без контакту з об'єктом - аеро- та фотозйомка, спектральний аналіз відбитої або випромінюваної енергії, лазерне сканування (LIDAR).

Такі методи дозволяють отримувати просторові моделі місцевості, карти теплових аномалій або індекси рослинності (NDVI).

1.3. Автоматизований збір даних

Передбачає використання контролерів, телеметричних модулів і програмних алгоритмів, які синхронізують дані з різних сенсорів, записують їх у єдиному форматі, забезпечують передачу у реальному часі або після польоту.

2. Методи обробки даних

Після збору сирі дані потребують очищення, структурування та аналізу. Це дозволяє отримати точні та інтерпретовані результати.

2.1. Фільтрація даних

Сенсорні дані з БПЛА часто містять шум через вібрації, погодні умови або перешкоди. Для цього використовують:

- **фільтр рухомого середнього** - згладжує випадкові коливання;
- **експоненціальне згладжування** - застосовується для динамічних показників;
- **фільтр Калмана** - найбільш точний метод для мобільних платформ.
- Фільтрація дозволяє виділити «корисний сигнал» та підвищити якість результатів.

2.2. Агрегація даних

Агрегація потрібна для структурування великих масивів інформації:

- **тимчасова агрегація** - об'єднання даних за секундними, хвилинними або годинними інтервалами;
- **просторова агрегація** - групування даних у територіальні клітинки (grid cells);
- **параметрична агрегація** - формування тематичних наборів (метеодані, хімічні показники, зображення).

Агреговані дані зручніші для подальшого аналізу та візуалізації.

2.3. Нормалізація та калібрування

Перед аналізом необхідно усунути відхилення, спричинені технічними або атмосферними факторами: корекція похибок сенсорів, приведення даних до єдиних одиниць, компенсація погодних умов (температура, вологість, освітленість).

2.4. Аналітична обробка

На цьому етапі застосовують: статистичний аналіз (середні значення, тренди, кореляції), регресійні моделі, просторовий аналіз у GIS, алгоритми машинного навчання (кластеризація, прогнозування).

Завдяки цьому можна визначити закономірності, прогнозувати зміни та оцінювати екологічний стан території.

Висновок

Методи збору та обробки даних формують основу сучасних систем моніторингу довкілля. Завдяки використанню БПЛА, потужних сенсорів і алгоритмів обробки інформації вдається отримувати високу точність, деталізацію та оперативність, що значно розширює можливості екологічного аналізу.

1.2.4. Приклади практичного застосування

Застосування безпілотних літальних апаратів у сфері екологічного моніторингу набуває все більшого поширення завдяки їхній універсальності, високій точності та здатності працювати у різних умовах. На практиці БПЛА використовуються у великій кількості сценаріїв, що дозволяє значно розширити можливості традиційних методів контролю довкілля. Можна виділити найбільш поширені та важливі приклади використання БПЛА у реальних екологічних дослідженнях.[1]

1. Моніторинг якості атмосферного повітря

БПЛА можуть оснащуватися газовими сенсорами, що дозволяє визначати концентрації CO₂, CO, NO_x, SO₂, летких органічних сполук та твердих частинок PM_{2.5}/PM₁₀. Це дає змогу:

- проводити оперативний контроль у зонах промислових підприємств;
- оцінювати рівень забруднення у містах;
- виявляти локальні «гарячі точки» шкідливих викидів;
- аналізувати поширення забруднювачів у різні погодні умови.

2. Виявлення та оцінка наслідків промислових аварій

У ситуаціях аварійних викидів хімічних речовин або витоків газів БПЛА дозволяють швидко отримати дані з небезпечних зон без ризику для людини. Дрони використовують для визначення площі та масштабу забруднення, вимірювання концентрацій токсичних сполук, побудови карт поширення забруднення, підтримки рятувальних та ліквідаційних операцій.

3. Моніторинг водних об'єктів

За допомогою мультиспектральних камер та датчиків фізико-хімічних параметрів БПЛА можуть оцінювати стан річок, озер, водосховищ, прибережних зон, зон скидання стічних вод і тд. Дрони дозволяють аналізувати забарвлення води, рівень замулення, наявність органічних та неорганічних домішок, а також теплові аномалії.

4. Оцінка стану рослинності та лісових масивів

БПЛА широко використовуються для визначення стану зелених насаджень та сільськогосподарських культур, виявлення зон деградації рослинності, оцінки індексів здоров'я рослин (NDVI, SAVI, EVI), моніторингу лісових пожеж та незаконних вирубок.

5. Картування рельєфу та зміни ландшафтів

Завдяки фотограмметрії та LiDAR-технологіям БПЛА здатні створювати 3D-моделі рельєфу, цифрові моделі поверхні, карти ерозійних процесів, моделі підтоплень та зсувів.

6. Спостереження за станом прибережних та морських екосистем

БПЛА застосовуються для моніторингу берегової лінії, виявлення зон ерозії, визначення стану прибережних екосистем, документування наслідків штормів або стихійних лих.

7. Агротехнічний та ґрунтовий моніторинг

У сільському господарстві дрони допомагають оцінювати структуру ґрунту, визначати проблемні ділянки, аналізувати вологість та поживність, контролювати врожайність, оптимізувати використання добрив і засобів захисту рослин.

Висновок

Практичне застосування БПЛА демонструє їхню високу ефективність у різних сферах екологічного моніторингу. Завдяки мобільності, точності та широким технічним можливостям дрони дозволяють оперативно отримувати інформацію, необхідну для прийняття рішень і забезпечення екологічної безпеки.

1.2.5. Переваги БПЛА для екологічного моніторингу

Інтеграція БПЛА із сенсорними платформами значно розширює можливості спостереження за станом довкілля, забезпечуючи отримання інформації з високою просторовою та часовою роздільністю. Розберемо основні переваги використання БПЛА.

Важливою перевагою є здатність працювати у важкодоступних і небезпечних зонах, де традиційні методи[2;3] можуть бути ризикованими або надто дорогими. БПЛА ефективно застосовуються у районах, забруднених хімічними чи радіаційними речовинами, у болотних, гірських або підтоплених місцевостях.

Крім цього, БПЛА відзначаються високою мобільністю та швидкістю розгортання. Для запуску дрона не потрібна стаціонарна інфраструктура: достатньо оператора, маршруту та живлення. Це робить їх незамінними у випадках, коли потрібно швидко оцінити екологічну ситуацію після аварії чи стихійного лиха.

Однією з ключових переваг є можливість оснащення різноманітними сенсорами - від температурних та газових до мультиспектральних камер і LiDAR-систем. Така гнучкість дозволяє проводити комплексний моніторинг повітря, води, ґрунтів і рослинності в межах одного польоту.

Також БПЛА є економічно вигідним інструментом, оскільки потребують менше ресурсів порівняно з пілотованою авіацією чи великими наземними вимірювальними станціями. Завдяки цьому можна проводити частий моніторинг великих територій без значних витрат.

Загалом БПЛА поєднують точність, оперативність, безпеку та універсальність, що дозволяє застосовувати їх не лише в наукових дослідженнях, а й у практичних екологічних проєктах, державному моніторингу та природоохоронних програмах.

1.2.6. Загальна структура екологічного моніторингу з БПЛА

Загальна структура екологічного моніторингу з використанням БПЛА являє собою послідовний процес(рис. 1.2), у якому дані проходять кілька взаємопов'язаних етапів - від моменту вимірювання до фінального представлення результатів. Спочатку під час польоту безпілотної працює сенсорний модуль, що включає різні типи датчиків, зокрема газові сенсори, модулі вимірювання твердих частинок, температури, вологості та за потреби спектральні або радіаційні прилади. Ці сенсори фіксують параметри довкілля у режимі реального часу, а їхні показники доповнюються координатами GPS та висотою, що дозволяє отримувати просторово прив'язані значення.

Усі зібрані сенсорами вимірювання надходять до бортового контролера, який відповідає за формування первинного масиву даних. На цьому етапі інформація має вигляд «сирих» показників, які ще містять шум, випадкові коливання та можуть бути нерівномірно зібрані через рух апарата або вплив зовнішніх умов. Тому після завершення збору дані обов'язково проходять етап фільтрації та очищення. Для цього застосовуються методи згладжування, такі як рухоме середнє, експоненціальне згладжування або фільтр Калмана, що дозволяють прибрати випадкові сплески та стабілізувати значення.

Після очищення дані агрегуються, тобто групуються у зручну для аналізу форму. Це може бути усереднення за певний проміжок часу, об'єднання вимірювань за окремими ділянками маршруту чи прив'язка до визначених секторів території.

Така агрегація дає змогу зменшити обсяг даних і водночас сформувати більш структуровану картину екологічного стану.

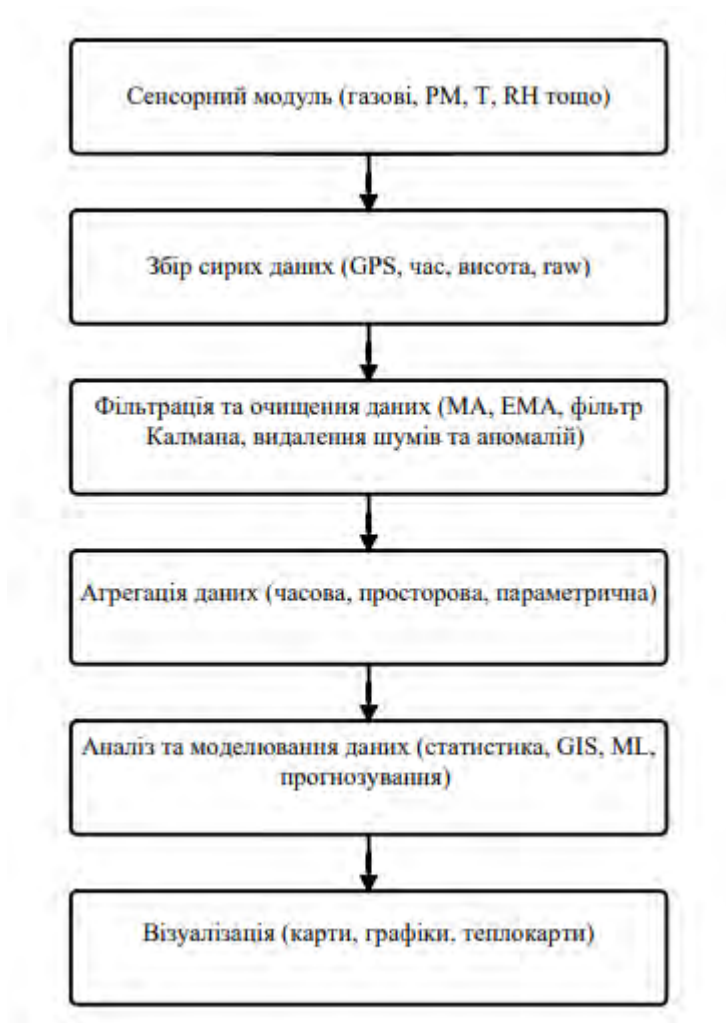


Рисунок 1.2 - Схема загальної структури екологічного моніторингу за допомогою БПЛА

Наступним етапом є аналітична частина роботи, де дані піддаються статистичному, просторовому та інколи машинному аналізу. Використання GIS-технологій дозволяє будувати карти концентрацій забруднювальних речовин, аналізувати просторові закономірності, виділяти проблемні зони та оцінювати зміни у часі. Крім того, можуть застосовуватися методи прогнозування або моделювання екологічних процесів, наприклад, поширення газових домішок або зміни індексів рослинності.

Завершальним етапом є візуалізація отриманих результатів. Дані подаються у вигляді карт, теплових діаграм, графіків, профілів забруднення за висотою або

інтерактивних дашбордів, що дозволяє легко інтерпретувати отриману інформацію. Таким чином, уся структура екологічного моніторингу з БПЛА забезпечує повний цикл роботи з екологічними даними: від точного збору на місцевості до аналітичної обробки та зручного представлення результатів для подальшого прийняття рішень.

1.3. Сенсорні технології для збору екологічних даних (температура, вологість, газові датчики, пил, радіація тощо)

Сенсорні технології дозволяють швидко й точно отримувати ключові екологічні дані - температуру, вологість, газу, пил, радіацію та інші параметри. Використання різних типів датчиків забезпечує комплексне оцінювання стану довкілля та оперативне реагування на його зміни (табл. 1.6).

Таблиця 1.6. Класифікація сенсорів, що використовуються в екологічному моніторингу

Категорія сенсорів	Типи сенсорів / моделі	Основні параметри	Застосування
Температурні сенсори	Термістори (NTC/PTC), термопари, цифрові (DS18B20, SHT21)	Температура повітря, води, ґрунту	Мікрокліматичні вимірювання, контроль теплових аномалій, БПЛА
Сенсори вологості	Ємнісні (DHT22, SHT31), резистивні, комбіновані модулі T/H	Вологість повітря	Прогнозування пожеж, контроль водяної пари, аналіз комфорту середовища
Газові сенсори	Електрохімічні, оптичні IR, MOS, NDIR	CO, NO ₂ , NO _x , O ₃ , SO ₂ , CO, VOC, CH ₄	Моніторинг якості повітря, контроль промислових викидів, аварійні ситуації
Датчики твердих частинок (PM1, PM2.5, PM10)	Plantower PMS5003/PMS7003, Honeywell HPM115S0, SDS011	Концентрація пилу, ультрадрібні частинки	Оцінка забруднення повітря, ефективність фільтрів, екологічний контроль
Радіаційні сенсори	Лічильники Гейгера-Мюллера (МГ-01, SBM-20), сцинтиляційні, напівпровідникові	Гамма-випромінювання, потужність дози, бета/рентген	Контроль радіаційно небезпечних територій, полігони, наслідки аварій
Сенсори якості води	pH, ОБП, DO, ЕС, turbidity, salinity	Кислотність, окисно-відновний потенціал, розчинений кисень, електропровідність, каламутність, солоність	Моніторинг річок, озер, стічних вод, оцінка стану водних екосистем

Категорія сенсорів	Типи сенсорів / моделі	Основні параметри	Застосування
Спектральні сенсори / мультиспектральні камери	Мультиспектральні (Red, Green, NIR), гіперспектральні, NDVI-камери	NDVI, EVI, SAVI, вологість та стрес рослинності, деградація ґрунтів	Агромоніторинг, лісові масиви, виявлення пожеж, стан ґрунтів
Лідарні технології (LiDAR)	Лазерні імпульсні системи	Відстань, рельєф, структура лісу, ерозія, зсуви	Картографування, моніторинг природних небезпек, 3D-моделювання рельєфу

Можна зробити висновок, що:

1. Сенсорні технології забезпечують оперативний і точний екологічний моніторинг, дозволяючи отримувати дані про атмосферу, воду, ґрунт і рослинність у режимі реального часу.
2. Різні категорії сенсорів охоплюють широкий спектр параметрів - температуру, вологість, концентрації газів, тверді частинки, радіацію, якість води та спектральні характеристики рослинності.
3. Комбінація різних типів датчиків дозволяє формувати комплексну картину стану довкілля, що підвищує точність аналізу та мінімізує ризик пропуску важливих екологічних змін.
4. Сучасні сенсори істотно розширюють можливості моніторингу завдяки високій чутливості та автоматизованому збору даних, що спрощує роботу дослідників та забезпечує високу достовірність вимірювань.
5. Використання передових технологій - спектральних камер, LiDAR, оптичних та газових сенсорів - відкриває можливість глибшого аналізу екосистем, включно з виявленням аномалій, оцінкою біологічного стану та прогнозуванням змін.
6. Сенсорні системи є ключовим елементом сучасного екологічного моніторингу, оскільки дозволяють швидко виявляти загрози, підтримувати природоохоронні рішення та забезпечувати екологічну безпеку територій. Використання компактних та мобільних сенсорів (для БПЛА, міністанцій) дозволяє охоплювати важкодоступні території та оперативно реагувати на зміни стану довкілля.

7. Комбінація різних типів сенсорів (температура, вологість, гази, пил, вода, спектральні, LiDAR) забезпечує комплексну оцінку екосистем, що важливо для прогнозування ризиків та прийняття управлінських рішень.

1.4. Сучасні програмні засоби аналізу даних у сфері екологічного моніторингу

Сучасні системи екологічного моніторингу, особливо ті, що використовують БПЛА, формують дуже великі обсяги просторових і часових даних. Найчастіше для опрацювання таких даних використовують геоінформаційні системи (GIS), зокрема QGIS, ArcGIS або Google Earth Engine. За їх допомогою можна проводити просторовий аналіз, будувати карти забруднення та визначати різні закономірності розподілу екологічних показників. GIS активно застосовуються і в науковій сфері, і в державних програмах екологічного контролю.

Важливу роль відіграють і програми фотограмметрії та 3D-моделювання, такі як Pix4D, Agisoft Metashape чи DroneDeploy. Вони потрібні для обробки зображень, отриманих з БПЛА, та створення ортофотопланів, цифрових моделей рельєфу, теплових карт і різних тривимірних моделей. Такі інструменти дозволяють детально оцінювати стан рослинності, аналізувати ерозійні процеси чи зміни ландшафтів.

Крім цього, все частіше використовуються програмні засоби статистичного аналізу та машинного навчання, наприклад Python, R, MATLAB або бібліотеки Scikit-learn, TensorFlow і PyTorch. Вони дають можливість аналізувати часові ряди, будувати моделі прогнозування та автоматично виявляти аномалії в даних.

Окреме місце займають хмарні платформи - AWS, Google Cloud, Microsoft Azure. Вони використовуються для зберігання великих наборів екологічних даних і забезпечують зручний доступ до них, а також дозволяють виконувати обчислення навіть при обробці дуже великих масивів інформації.

Для наочного подання результатів застосовують інструменти візуалізації: Tableau, Power BI, Grafana або різні графічні бібліотеки Python. Завдяки цьому дані перетворюються на зрозумілі графіки, схеми чи інтерактивні карти.

Отже, сучасні програмні засоби є невід’ємною частиною екологічних систем моніторингу. Вони дозволяють не лише швидко та якісно обробляти великі обсяги даних, але й роблять результати більш зрозумілими для подальшого аналізу.

Таблиця 1.7. Порівняльні особливості основних програмних інструментів

Програмний засіб	Основний тип даних	Сильні сторони	Обмеження
QGIS, ArcGIS	Геодані, растри, просторові дані	Безкоштовний, гнучкий, потужні аналітичні інструменти, готові модулі	Потребує підготовки, висока вартість ліцензії
Pix4D	Фото/відеодані	Висока точність 3D-моделей, теплові карти	Велике навантаження на ресурси
Python	Числові дані	Машинне навчання, гнучкі бібліотеки	Потрібно програмування
Tableau Power BI	Будь-які	Візуалізація, інтерактивні панелі	Обмежена аналітика
Google Earth Engine	Супутникові дані	Потужні хмарні обчислення і великі архіви даних	Потребує інтернету

Подана табл. 1.7 узагальнює ключові характеристики програмних інструментів, що застосовуються в екологічному моніторингу, та демонструє їхні відмінності за функціональністю. Із порівняння видно, що геоінформаційні системи найкраще підходять для просторових операцій та картографічних завдань, тоді як фотограмметричні програми ефективні при роботі з даними БПЛА та створенні високоточних моделей місцевості. Інструменти статистичного аналізу та машинного навчання забезпечують глибоку обробку числових даних і побудову прогностичних моделей, а платформи для візуалізації допомагають перетворювати результати на інформативні графіки та аналітичні панелі. Хмарні сервіси вирізняються можливістю масштабування та роботою з великими масивами даних.

1.5. Постановка завдання дослідження

В умовах сучасних екологічних викликів необхідність ефективного моніторингу навколишнього середовища стає все більш актуальною. Забруднення повітря, води та ґрунту, деградація природних екосистем, зміни клімату та надзвичайні ситуації вимагають застосування сучасних технологій збору та обробки

даних для своєчасного виявлення проблем та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

На основі аналізу сучасних підходів до моніторингу довкілля, у тому числі з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та сенсорних технологій, були визначені основні проблеми та обмеження традиційних методів:

- обмежена просторово-часова роздільність даних;
- недостатня оперативність збору та обробки інформації;
- високі витрати на проведення наземних та авіаційних спостережень;
- складність інтеграції різнорідних джерел даних у єдину систему аналізу.

Метою даного дослідження є розробка комплексного підходу до екологічного моніторингу з використанням БПЛА та сенсорних систем, інтегрованих із сучасними програмними засобами для збору, обробки та аналізу даних.

Основні завдання дослідження включають:

Провести аналіз сучасних методів та технологій екологічного моніторингу, включаючи БПЛА та сенсорні платформи.

Дослідити типи та характеристики сенсорних систем, що застосовуються для збору фізико-хімічних та біологічних параметрів навколишнього середовища.

Оцінити сучасні програмні засоби обробки, аналізу та візуалізації екологічних даних.

Розробити методологію інтеграції даних з різних джерел у єдину систему аналізу для підвищення точності та оперативності прийняття рішень. Провести практичне дослідження, використовуючи БПЛА та сенсорні системи, для оцінки стану обраної території.

Розробити рекомендації щодо оптимізації процесів екологічного моніторингу та підвищення ефективності управління природними ресурсами.

Таким чином, постановка завдання дослідження формує чіткий план дій, спрямований на підвищення ефективності моніторингу довкілля за рахунок використання сучасних технологій збору та аналізу даних.

Висновок

У першому розділі було розглянуто теоретичні та методичні засади побудови сучасних систем екологічного моніторингу, а також окреслено місце безпілотних літальних апаратів і сенсорних технологій у цьому процесі. Показано, що за умов зростання техногенного навантаження, урбанізації та кліматичних змін оперативний контроль стану довкілля перетворюється на один із ключових інструментів забезпечення екологічної безпеки та прийняття управлінських рішень.

Було проаналізовано підходи до організації автоматизованих систем моніторингу довкілля (АСМД) та визначено їх основні завдання: від збору первинних даних і перевірки їх відповідності нормативам - до аналітичної обробки, моделювання процесів та оперативного інформування відповідальних структур. Окрему увагу приділено класифікації систем моніторингу за об'єктами контролю, територіальною масштабністю, ступенем автоматизації, частотою збору даних та способом доступу до інформації. Такий підхід дозволив показати, що екологічний моніторинг може бути організований як на рівні окремого об'єкта чи підприємства, так і в межах регіональних, національних та глобальних систем спостереження.

У межах розділу детально розглянуто роль безпілотних літальних апаратів у моніторингу навколишнього середовища. Показано, що БПЛА забезпечують високу просторово-часову роздільність даних, доступ до важкодоступних або небезпечних територій, зменшення вартості спостережень та гнучкість у виборі типів датчиків. Наведено класифікацію основних типів БПЛА та проаналізовано їхнє застосування для різних завдань екологічного контролю, зокрема для моніторингу повітря, води, ґрунтів, рослинності та рельєфу.

Окремо розглянуто сенсорні технології для вимірювання температури, вологості, газових домішок, твердих частинок, радіаційного фону, параметрів водних систем, а також спектральні та лідарні системи. Було показано, що саме комплексний підхід до використання різних типів сенсорів дає змогу формувати багатовимірну картину стану довкілля та відстежувати зміни в різних компонентах екосистем.

Також проаналізовано сучасні програмні засоби, що застосовуються для обробки й аналізу екологічних даних: геоінформаційні системи, фотограмметричні платформи, інструменти статистики та машинного навчання, хмарні сервіси та засоби візуалізації. Показано, що саме програмна складова забезпечує можливість перетворення сирих вимірювань на зрозумілі карти, графіки, аналітичні панелі та прогностичні моделі, які є основою для прийняття обґрунтованих рішень.

На завершення в розділі було сформульовано постановку завдання дослідження, яка логічно випливає з проведеного аналізу. Визначено, що актуальною є розробка комплексного підходу до екологічного моніторингу з використанням БПЛА, сенсорних систем та сучасних програмних засобів, а також інтеграція різномірних даних у єдину систему аналізу. Таким чином, розділ 1 створює теоретичну та методологічну основу для подальших практичних розробок і експериментальних досліджень, що будуть представлені у наступних розділах магістерської роботи.

Розділ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Архітектура автоматизованих систем збору та аналізу даних

Архітектура автоматизованих систем збору та аналізу даних (АСЗАД) (рис. 2.1) описує, як саме працює система від моменту отримання даних до формування готових результатів. Зазвичай така архітектура складається з кількох рівнів, у яких поєднуються апаратні, програмні та комунікаційні елементи. Разом вони забезпечують постійний цикл збору, передавання, обробки та візуалізації екологічної інформації.

Першим і найважливішим є рівень сенсорів. Тут встановлені різні датчики - температурні, газові, спектральні, радіаційні тощо. Вони можуть бути розміщені на БПЛА, стаціонарних постах або мобільних платформах. Саме на цьому етапі формується первинна інформація, яка одразу отримує координати та часову мітку через GPS.

Далі дані потрапляють на рівень первинної обробки, де працюють мікроконтролери або невеликі бортові комп'ютери. Вони зчитують дані з сенсорів, проводять базове фільтрування та перевіряють коректність вимірювань. Тут же можуть застосовуватися прості алгоритми згладжування, щоб зменшити шум.

Після цього дані передаються через бездротові технології - Wi-Fi, LTE/5G, LoRaWAN або навіть супутниковий зв'язок. Вибір каналу залежить від умов роботи системи та необхідної швидкості передачі. У деяких випадках передавання відбувається вже після завершення польоту або під час підключення пристрою до комп'ютера.

Центральним елементом архітектури є сервер або хмарна платформа. Тут дані зберігаються, обробляються та аналізуються. Використовуються бази даних, алгоритми машинного навчання, статистичні методи та інструменти просторової аналітики. Саме на цьому рівні формується більшість аналітичних результатів.

Наступний рівень - аналітичний. Дані інтегруються в GIS-системи, моделі прогнозування та системи підтримки прийняття рішень. На цьому етапі формуються

карти, створюються прогнози ситуації і генеруються сигнали про можливі перевищення нормативів.

Останній рівень - це інтерфейс користувача. Він може бути представленим у вигляді веб-панелі, мобільного додатку або спеціальної консолі. Тут дані відображаються у вигляді графіків, таблиць, карт і готових звітів. Саме цей рівень забезпечує зручність роботи користувача та дозволяє швидко реагувати на зміни в екологічних параметрах.

У підсумку, архітектура АСЗАД складається з послідовних модулів - від сенсорів до систем аналізу й візуалізації. Кожен рівень відіграє важливу роль і забезпечує точність, надійність та повноту екологічних даних.

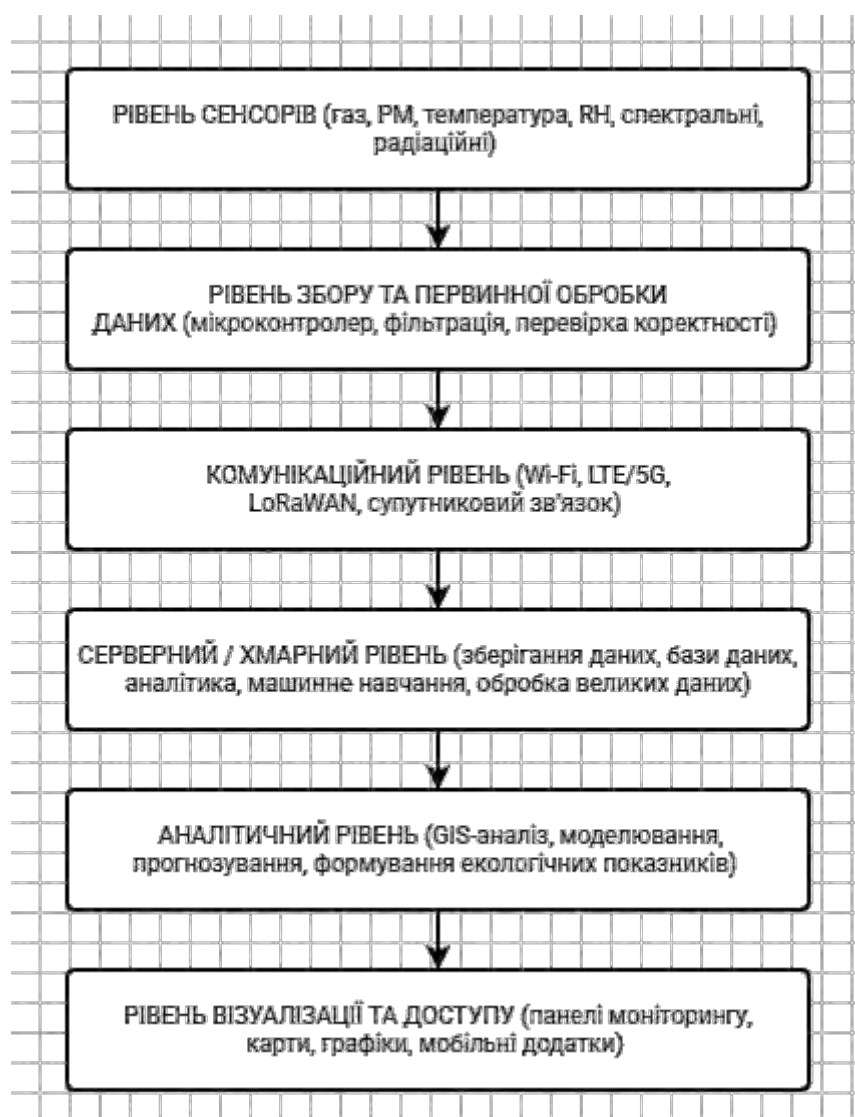


Рисунок 2.1 - Схема архітектури автоматизованих систем збору та аналізу даних

2.2. Математичні моделі збору та обробки екологічних даних

Математичні моделі у системах екологічного моніторингу відіграють ключову роль, оскільки забезпечують формалізоване представлення процесів збору, обробки та інтерпретації даних. Дані, отримані від сенсорів або БПЛА, зазвичай є нерівномірними, зашумленими та залежними від багатьох зовнішніх факторів. Тому математичні методи потрібні для того, щоб перетворити “сирі” вимірювання на надійну та корисну інформацію, придатну для аналізу стану довкілля та прийняття рішень.

Одним із перших етапів є моделювання процесу вимірювання, яке враховує похибки сенсорів, часові затримки та випадкові флуктуації. Часто використовується модель виду

$$x_{\text{вим}} = x_{\text{іст}} + \varepsilon, \quad (2.1)$$

Де $x_{\text{вим}}$ – виміряне значення, $x_{\text{іст}}$ – істинне значення параметра, а ε – похибка або шум. Таке представлення дозволить математично врахувати похибки та застосувати подальші фільтрації.

Для згладжування шумів та відокремлення корисного сигналу застосовуються фільтри часових рядів, такі як ковзне середнє, експоненціальне згладжування та, у складніших системах, фільтр Калмана. Останній особливо корисний у БПЛА, оскільки дозволяє синтезувати дані з різних сенсорів і враховувати динаміку руху апарата. Його базова форма описується системою рівнянь стану:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + \omega_k, \quad (2.2)$$

$$z_k = Hx_{k-1} + v_k, \quad (2.3)$$

Де ω_k та v_k – випадкові шуми процесу та вимірювання. Завдяки цьому модель компенсує вплив вітру, вібрацій та нестабільності сигналу.

На етапі узагальнення інформації використовуються методи агрегації, що допомагають переходити від точкових вимірювань до узагальнених карт або середніх значень на вибраних ділянках. Зазвичай це реалізується у вигляді просторового усереднення, кластеризації або побудови регулярних сіток (гридів). Для таких задач

часто застосовують методи інтерполяції - наприклад, крігінг або радіально-базисні функції, які дозволяють відновити неперервне поле концентрацій забруднювачів.

На наступному етапі використовуються моделі аналізу та прогнозування, за допомогою яких можна визначити тенденції, виявити закономірності та передбачити можливу динаміку змін параметрів довкілля. Найчастіше використовуються моделі регресії (лінійна, поліноміальна, логістична), часові моделі (ARIMA, SARIMA) та алгоритми машинного навчання (дерева рішень, випадкові ліси, нейронні мережі). Перевага таких моделей полягає у здатності працювати з великими масивами даних та враховувати складні взаємозв'язки між величинами, наприклад, залежність концентрації пилу від температури, вологості та швидкості вітру.

Завершальною частиною математичного моделювання є перетворення результатів у придатну форму, що включає нормування даних, масштабування, генерацію просторових шарів та формування числових показників (індексів). Наприклад, для оцінки стану рослинності застосовується модель NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (2.4)$$

яка дозволяє визначати рівень “здоров’я” рослинного покриву на основі спектральних вимірювань.

Таким чином, математичні моделі в АСЗАД забезпечують надійну основу для обробки екологічних даних - від первинного очищення до прогнозних оцінок. Вони дозволяють точніше відтворювати реальні процеси, підвищують достовірність системи моніторингу та допомагають оперативно реагувати на зміни стану довкілля.

2.3. Методи фільтрації, агрегації та передачі даних з БПЛА

Екологічні дані, які надходять із сенсорів, встановлених на борту БПЛА, зазвичай є нерівномірними, зашумленими й можуть містити випадкові сплески, пов'язані з коливаннями апарата, зміною швидкості польоту або особливостями роботи датчиків. Тому перед подальшим аналізом інформація повинна пройти кілька етапів обробки: фільтрацію, агрегацію та передачу у наземні або хмарні системи. Ці

етапи забезпечують високу якість даних і дають змогу використовувати результати для картографування, моделювання та оцінки стану довкілля.

Фільтрація даних

Фільтрація є першим і найбільш критичним етапом обробки. Вона спрямована на усунення шумів, аномальних точок і згладження коливань сигналу. Для фільтрації екологічних даних використовують такі моделі:

- **Ковзне середнє (МА)** - один із найпростіших методів, що усереднює певне вікно значень і згладжує різкі зміни. Добре працює при аналізі стабільних часових рядів, наприклад, температури або вологості.
- **Експоненціальне згладжування (ЕМА)** - дозволяє враховувати важливість не лише останніх, але й попередніх значень, зменшуючи їхній вплив за експоненціальним законом. Підходить для параметрів, що демонструють короткочасні коливання, але зберігають загальний тренд.
- **Фільтр Калмана** - найбільш точний метод для рухомих платформ, оскільки враховує динаміку апарата, прогнозує очікуване значення та коригує його з урахуванням вимірювань. Широко застосовується для фільтрації концентрацій газів, пилу та синхронізації GPS-даних.[15]

Завдяки цим методам дані стають стабільнішими, а похибки сенсорів мінімізуються.

Агрегація даних

Другим етапом обробки є агрегація, яка дозволяє перейти від точкових вимірювань до узагальнених характеристик території. Залежно від мети дослідження використовуються такі види агрегації:

- **Часова агрегація** - об'єднання вимірювань у більші часові інтервали (наприклад, 1 хвилина, 5 хвилин). Це допомагає зменшити обсяг даних та виділити сталі тренди.
- **Просторова агрегація** - дані групуються відповідно до координат. Територія ділиться на квадрати (грид), і для кожного з них обчислюються середні або максимальні значення. Це є основою для побудови карт забруднення.
- **Параметрична агрегація** - об'єднання різних типів даних, наприклад, температура + вологість + концентрація пилу, для подальшого багатofакторного аналізу.

Передача даних

Третій важливий етап - забезпечення надійної та безперервної передачі даних з БПЛА на наземну станцію або у хмару. Вибір технології передачі залежить від швидкості польоту, необхідної пропускну здатності та віддаленості.

Найпоширеніші методи передачі:

- **Wi-Fi та радіоканал** - використовуються при невеликій відстані між БПЛА та оператором. Підходять для передавання неперервного потоку даних у реальному часі.
- **LTE/4G/5G** - дають змогу передавати інформацію на значні відстані, забезпечують стабільний канал зв'язку та підходять для хмарних систем моніторингу.
- **LoRaWAN** - енергоефективна технологія для передавання невеликих пакетів даних на великі відстані. Використовується у випадках, коли потрібно передавати телеметрію або окремі параметри.
- **Офлайн-передача** - дані зберігаються у пам'яті пристрою та передаються після завершення польоту. Такий підхід ефективний при великих обсягах фотограмметричних або спектральних даних.

Надійна передача даних забезпечує інтеграцію польових вимірювань із серверними системами, де вони проходять подальшу аналітичну обробку.

Висновок

Методи фільтрації, агрегації та передачі даних є основою якісної обробки екологічної інформації, отриманої з БПЛА. Вони забезпечують точність, структурованість і доступність даних, що робить можливою побудову достовірних карт забруднення, просторових моделей і прогнозів, необхідних для ефективного екологічного моніторингу.

2.4. Методи просторової локалізації та прив'язки даних до координат

Просторова локалізація(рис. 2.2) є обов'язковим етапом у системах екологічного моніторингу з використанням БПЛА, оскільки будь-які вимірювання мають практичну цінність лише тоді, коли до них додані точні координати. Саме завдяки просторовій прив'язці можна будувати карти забруднення, оцінювати

розподіл екологічних параметрів та виконувати порівняння з іншими джерелами даних.

Спочатку БПЛА реєструє показники різних сенсорів: газових датчиків, датчиків пилу (PM), температури, вологості, спектральних камер тощо. Але самі ці показники «не прив'язані» до місцевості, тому потребують координат.

Координати та час вимірювання отримуються через GNSS-модуль (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). У стандартних умовах точність складає 1–5 метрів, що підходить для більшості базових задач. Кожне вимірювання доповнюється геолокаційною міткою.

Щоб підвищити точність координат, дані з GNSS та IMU поєднуються між собою. Найпоширеніший метод - фільтр Калмана, який згладжує шум, усуває різкі стрибки та формує більш точну траєкторію польоту.

Для задач, де потрібна сантиметрова точність (2–5 см), застосовуються методи високоточного позиціонування:

- RTK (Real-Time Kinematic) - корекція координат у режимі реального часу за допомогою базової станції.
- PPK (Post-Processed Kinematic) - корекція координат після польоту на основі точних еталонних даних.

На цьому етапі до кожного значення (температура, концентрація газів, PM тощо) додаються точні координати й висота.

Формуються «пари»: дані сенсора + координата = геопросторове вимірювання

Після завершення польоту всі геоприв'язані дані завантажуються у GIS-систему (QGIS, ArcGIS).

Тут вони перетворюються на:

- векторні шари (точки, лінії, полігони),
- растрові шари (теплові карти, карти концентрацій),
- ґрид-моделі,
- карти забруднення та просторові моделі.

Ці шари використовують для інтерполяції, побудови ізоліній, аналізу «гарячих точок», моделювання потоків повітря або води.

Висновок

Методи просторової локалізації дають змогу точно прив'язувати екологічні дані до місцевості та забезпечують високий рівень достовірності моніторингу. Від точності GNSS, роботи IMU, RTK/PPK-корекції та інтеграції сенсорів залежить якість карт, моделей та аналітичних рішень, що приймаються на основі даних БПЛА.



Рисунок 2.2 - Загальний процес просторової локалізації даних з БПЛА

2.5. Вибір критеріїв ефективності системи

Оцінювання ефективності автоматизованої системи збору та аналізу даних є важливим етапом, оскільки саме від цього залежить, наскільки система здатна забезпечувати точні та своєчасні екологічні дані. Для цього використовують кілька основних критеріїв (табл. 2.1), які дозволяють комплексно оцінити роботу системи.

Таблиця 2.1. Перелік критеріїв ефективності системи

Критерій	Сутність критерію	Чому важливий	Що оцінює
Точність вимірювань	Відображає, наскільки отримані значення відповідають реальному стану довкілля.	Забезпечує достовірність даних, на основі яких приймаються рішення та формуються прогнози.	Рівень похибки сенсорів, стабільність показників, вплив зовнішніх факторів.
Оперативність	Характеризує швидкість збору, обробки та передачі даних.	Важлива для своєчасного реагування на небезпечні зміни та аномалії.	Затримку передачі даних, частоту оновлення, швидкість аналітичного обчислення.
Надійність	Здатність системи працювати стабільно та безвідмовно у різних умовах.	Знижує ризики втрати даних і збоїв у роботі системи.	Стійкість до збоїв, відмовостійкість обладнання, якість зв'язку.
Масштабованість	Можливість розширення системи без значних змін у її архітектурі.	Дозволяє адаптувати систему під більші території або більшу кількість датчиків.	Легкість інтеграції нових модулів, сенсорів і програмних компонентів.
Інформативність	Обсяг та змістовність даних, які система може зібрати та представити.	Визначає аналітичну цінність системи та повноту екологічного аналізу.	Кількість параметрів, глибину аналізу, формат візуалізації.
Енергоефективність	Оптимальне використання енергії сенсорами та комунікаційними модулями.	Важлива для автономних систем, особливо на БПЛА та віддалених станціях.	Час автономної роботи, споживання енергії, підтримка режимів енергозбереження.
Безпека та захист даних	Рівень захищеності інформації та роботи системи від несанкціонованого доступу.	Захищає екологічні дані, запобігає втручанню та фальсифікаціям.	Методи шифрування, доступ користувачів, захист каналів зв'язку.

З таблиці вище можна зробити висновок, що ефективність автоматизованої системи екологічного моніторингу визначається сукупністю технічних,

функціональних та безпекових характеристик. Кожен критерій відіграє важливу роль у забезпеченні стабільної та достовірної роботи системи. Точні вимірювання гарантують правильність отриманих результатів, оперативність дозволяє швидко реагувати на зміни в довкіллі, а надійність мінімізує ризики збоїв. Масштабованість робить систему гнучкою для розширення, інформативність визначає повноту аналітики, енергоефективність - можливість автономної роботи, а безпека - захищеність зібраних даних.

Висновок

У другому розділі було розглянуто теоретичні та методичні основи побудови автоматизованої системи збору та аналізу даних (АСЗАД) для екологічного моніторингу з використанням БПЛА. Поступовий аналіз архітектури, математичних моделей, методів обробки та просторової прив'язки даних дозволив сформулювати цілісне уявлення про те, як повинна працювати сучасна інтелектуальна система моніторингу довкілля.

Перш за все було показано, що архітектура АСЗАД є багаторівневою й включає сенсорний рівень, рівень збору та первинної обробки даних, комунікаційний сегмент, серверно-хмарну інфраструктуру, аналітичний рівень та рівень візуалізації. Саме узгоджена взаємодія цих компонентів забезпечує безперервний цикл роботи з екологічною інформацією - від моменту вимірювання на борту БПЛА до представлення результатів користувачеві у зручній формі.

Далі було розглянуто математичні моделі, які лежать в основі роботи АСЗАД. Зокрема, акцент зроблено на моделях вимірювання, фільтрації, інтерполяції та прогнозування. Використання фільтрів часових рядів, фільтра Калмана, регресійних та геостатистичних моделей дозволяє перетворювати “сирі” сенсорні дані на структуровану, очищену та аналітично корисну інформацію. Це є критично важливим для підвищення достовірності оцінки стану довкілля та побудови прогнозів його змін.

Окрему увагу приділено методам фільтрації, агрегації та передачі даних з БПЛА. Показано, що якість кінцевих результатів значною мірою залежить від

правильно організованих етапів попередньої обробки: згладжування шумів, часової та просторової агрегації, вибору відповідної технології зв'язку (Wi-Fi, LTE/5G, LoRaWAN, офлайн-передача). Це забезпечує баланс між точністю, обсягом даних і можливостями подальшого аналізу.

Важливим аспектом стало вивчення методів просторової локалізації та прив'язки даних до координат. Використання GNSS, технологій DGPS, RTK/PPK, а також інтеграції з інерційними системами (IMU) дозволяє досягати високої точності геопросторового позиціонування. Це, у свою чергу, робить можливим формування коректних карт забруднення, просторових моделей та аналітичних шарів у GIS-системах, без чого сучасний екологічний моніторинг є практично неможливим.

На завершення розділу було визначено основні критерії ефективності АСЗАД: точність, оперативність, надійність, масштабованість, інформативність візуалізації, енергоефективність та безпека даних. Виділення й систематизація цих критеріїв дозволяє не лише оцінювати якість роботи конкретної системи, а й порівнювати різні варіанти реалізації та обґрунтовано обирати оптимальні рішення.

Узагальнюючи результати другого розділу, можна зробити висновок, що побудова ефективної автоматизованої системи екологічного моніторингу потребує комплексного підходу, який поєднує продуману архітектуру, коректні математичні моделі, надійні канали передачі даних та чітко визначені критерії оцінки ефективності. Отримані теоретичні напрацювання слугують основою для подальшої практичної реалізації та експериментальної перевірки запропонованих рішень у наступних розділах магістерської роботи.

Розділ 3. ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Загальна структура системи (БПЛА, сенсори, комунікаційні модулі, наземна станція)

Автоматизована система збору та аналізу даних про параметри довкілля з використанням безпілотного літального апарата (БПЛА) являє собою комплекс технічних та програмних засобів, які працюють як єдина інтегрована система. Її основною задачею є отримання достовірних екологічних даних у режимі реального часу або з подальшим опрацюванням після польоту. Загальна структура системи (табл. 3.1) включає чотири основні елементи: бортовий комплекс БПЛА, сенсорний модуль, комунікаційні засоби та наземну станцію.

Таблиця 3.1 Загальна структура системи екологічного моніторингу на базі БПЛА

Компонент системи	Підсистема / елемент	Основні функції	Ключові характеристики	Приклади Моделі /
Безпілотний літальний апарат (БПЛА)	Аероплатформа (квадрокоптер, літак, гексакоптер)	Несе сенсорний комплекс, виконує маршрут збору даних	Автономність, вантажопідйомність, час польоту, стабільність	DJI Matrice 300, PX4, ArduPilot
	Політний контролер	Керування рухом, стабілізація, навігація	GPS/GLONASS, IMU, барометр, автопілот	Pixhawk, Cube Orange
	Енергосистема БПЛА	Забезпечення живлення всіх модулів	Ємність батареї, споживання енергії, час роботи	LiPo 6S 10000 mAh
Сенсорний комплекс	Температурні датчики	Вимірювання температури повітря/грунту	Точність, діапазон	DS18B20, SHT21
	Датчики вологості	Контроль вологості повітря	Стабільність, точність	SHT31, DHT22
	Газові сенсори	Вимірювання CO ₂ , CO, NO ₂ , VOC, O ₃	Тип чутливого елемента, час відгуку	MH-Z19B, MiCS-4514

Компонент системи	Підсистема / елемент	Основні функції	Ключові характеристики	Приклади Моделі /
	Сенсори пилу	Вимірювання PM1, PM2.5, PM10	Оптичний принцип, точність	PMS7003, SDS011
	Радіаційні сенсори	Вимірювання гамма/бета випромінювання	Чутливість, енергетичний діапазон	SBM-20, МГ-01
	Сенсори якості води	pH, EC, DO, turbidity	Стійкість, захист від вологи	Atlas Scientific
	Спектральні камери	Дані щодо рослинності	NDVI, NIR	MicaSense RedEdge
	LiDAR	3D рельєф, рослинність	Дальність, щільність хмар точок	RPLIDAR, Velodyne
Система обробки даних на борту (Бортовий комп'ютер)	Мікрокомп'ютер	Первинне опрацювання даних	Продуктивність, енергоефективність	Raspberry Pi, Jetson Nano
	Модуль пам'яті	Зберігання даних у польоті	Обсяг, швидкість запису	SD 128–256 GB
	Алгоритми фільтрації	Шумозаглушення, компенсація	FIR, IIR, адаптивна фільтрація	MATLAB/Python реалізації
Канали зв'язку та комунікаційні модулі	Радіоканал 433/915 МГц	Телеметрія, керування	Велика дальність, низький трафік	SiK Radio
	Wi-Fi модулі	Передача даних поблизу	Висока швидкість	ESP32, Ubiquiti
	LTE/4G/5G модулі	Дальня передача даних	Широке покриття, мобільність	Quectel EC25
	LoRaWAN	Далекі дистанції, низький енергоспоживання	Низька швидкість, стійкість	RFM95
Наземна станція (Ground)	Комп'ютер оператора	Прийом і відображення даних	Висока продуктивність	Ноутбук, планшет

Компонент системи	Підсистема / елемент	Основні функції	Ключові характеристики	Приклади Моделі /
Control Station, GCS)				
	Програмне забезпечення GCS	Керування польотом, телеметрія	Карти, маршрути, логування	QGroundControl, Mission Planner
	Антенно-комунікаційний блок	Підсилення сигналу зв'язку	Дальність, стабільність	Yagi, Patch antenna
Серверна частина та аналітична система	Хмарний сервер / локальний сервер	Зберігання та обробка великих обсягів даних	Масштабованість, резервування	AWS, Azure, Local server
	Аналітичні алгоритми	Виявлення аномалій, статистика	ML/AI, моделі прогнозування	Python, TensorFlow
	GIS-система	Картографічна візуалізація	Геоприв'язка, 3D-карти	QGIS, ArcGIS
Інтерфейс користувача	Панель моніторингу	Візуалізація параметрів	Графіки, карти, таблиці	Grafana, Power BI
	Мобільний додаток	Доступ у полі	Сповіщення, аналітика	Android/iOS

На основі наведеної таблиці можна зробити висновки, що автоматизована система збору та аналізу екологічних даних із використанням БПЛА має складну, багаторівневу структуру, у якій кожен компонент виконує важливу функцію та забезпечує узгоджену роботу всієї системи. БПЛА виступає основною платформою для транспортування сенсорного комплексу та виконання польотних завдань, тоді як різноманітні датчики забезпечують збирання даних про параметри довкілля з високою точністю. Комунікаційні модулі відповідають за надійну передачу інформації на наземну станцію, де відбувається управління польотом і попередній аналіз телеметрії. Бортовий комп'ютер виконує первинну обробку та зберігання даних, що підвищує оперативність і продуктивність системи. Завершальним

елементом є аналітичні та серверні рішення, які дозволяють виконувати глибоку обробку, геоприв'язку та візуалізацію інформації.

Таким чином, система працює як єдиний інтегрований комплекс, у якому апаратна, програмна та комунікаційна частини доповнюють одна одну, забезпечуючи високу точність, надійність та ефективність екологічного моніторингу.

3.2. Вибір та обґрунтування сенсорів для моніторингу довкілля

Під час розробки системи екологічного моніторингу дуже важливо правильно підібрати сенсори, адже саме вони забезпечують збирання всіх вихідних даних.

Критерії вибору сенсорів

Під час підбору сенсорів для системи було враховано такі ключові критерії(табл. 3.2):

Таблиця 3.2. Перелік критеріїв вибору сенсорів

Критерій	Сутність критерію	Що оцінює при виборі сенсора	Чому важливо
Тип вимірюваного параметра	Відповідність сенсора конкретному екологічному показнику	Температура, вологість, гази, РМ, радіація, спектр, вода	Забезпечує коректність і повноту зібраних даних
Діапазон вимірювань	Межі мінімальних та максимальних значень	Робочий діапазон сенсора відповідно до природних умов	Гарантує адекватність роботи у реальних екосистемах
Точність і похибка	Наскільки близькі показники до реальних значень	Абсолютна/відносна похибка, стабільність	Впливає на достовірність екологічного аналізу
Чутливість	Здатність сенсора реагувати на малі зміни параметра	Порогова чутливість, мінімально вимірювана величина	Критично для виявлення слабких забруднень або аномалій
Швидкість відгуку	Час, за який сенсор фіксує зміну параметра	Response time	Важливо для динамічних процесів

Критерій	Сутність критерію	Що оцінює при виборі сенсора	Чому важливо
			(викиди, зміни повітря)
Стійкість до умов довкілля	Робота в складних умовах	Температура, вологість, пил, удари, вібрації	Визначає надійність у польових умовах та на БПЛА
Енергоспоживання	Витрати енергії сенсором	Потужність, режими енергозбереження	Важливо для автономних станцій і дронів
Інтерфейси та сумісність	Узгодженість із мікроконтролерами та системою	UART, I ² C, SPI, аналогові виходи	Полегшує інтеграцію та зменшує складність системи
Габарити та маса	Фізичні розміри та вага сенсора	Маса та форма	Важливо для БПЛА, де є обмеження з ваги й простору
Вартість та економічність	Співвідношення ціна/якість	Первинна вартість, ресурс роботи	Дозволяє оптимізувати бюджет проєкту
Надійність та термін служби	Стійкість сенсора до старіння та зносу	MTBF, ресурс елемента	Впливає на стабільність моніторингової системи
Захист калібрування	Необхідність і частота калібрування	Калібрування в полі чи лабораторне	Забезпечує правильну роботу протягом терміну експлуатації

Газові сенсори для визначення концентрацій забруднювачів

Для вимірювання концентрації вуглекислого газу в системі екологічного моніторингу було обрано інфрачервоний датчик МН-Z19В(рис. 3.1), який є одним із найбільш поширених та надійних сенсорів у цій категорії, а також забезпечує високу точність та стабільність показників(табл. 3.3).[12]

Рисунок 3.1 - Датчик вуглекислого газу CO₂ MH-Z19BТаблиця 3.3. Технічні характеристики датчика CO₂ MH-Z19B

Параметр	Значення / Опис
Тип сенсора	NDIR (недисперсійний інфрачервоний)
Вимірюваний газ	Вуглекислий газ CO ₂
Діапазон вимірювання	0–2000 ppm (також є версії 0–5000 ppm та 0–10000 ppm)
Точність вимірювань	±(50 ppm + 3–5% від виміряного значення)
Час нагріву / стабілізації	~3 хвилини
Час відгуку	<120 секунд
Робоча температура	0...50 °C (іноді –10...50 °C залежно від версії)
Робоча вологість	0–90% RH (без конденсату)
Розміри	33 мм × 20 мм × 9 мм
Вага	~5 г
Довговічність та стійкість	Антикорозійна камера, стійкість до вологості
Особливості	Висока вибірковість до CO ₂ , стабільна робота, низьке енергоспоживання

Датчик MH-Z19B - це збалансований вибір для роботи з екологічного моніторингу: він поєднує достатню технічну характеристику, доступну інтеграцію з БПЛА-платформою, економічну ефективність і надійність.

Датчики твердих частинок (пилу)

Для вимірювання концентрації твердих частинок у повітрі (PM1.0, PM2.5 та PM10) у системі екологічного моніторингу обрано оптичний датчик PMS7003 від компанії Plantower(рис. 3.2). Цей сенсор є одним із найпопулярніших у дослідницьких та інженерних проєктах завдяки своїй точності, стабільності й компактній конструкції(табл. 3.4).[13]



Рисунок 3.2 - Датчик пилу PM2.5 PMS7003

Таблиця 3.4. Технічні характеристики датчика пилу PM2.5 PMS7003

Параметр	Значення / Опис
Тип сенсора	Лазерний оптичний сенсор на основі розсіювання світла
Вимірювані параметри	PM1.0, PM2.5, PM10 (мкг/м³)
Принцип роботи	Лазерне випромінювання + фотодіод для вимірювання інтенсивності розсіяного світла
Діапазон вимірювання	0...500 мкг/м³
Точність вимірювань	±10% при стандартних умовах
Роздільна здатність	1 мкг/м³
Температурний діапазон роботи	-10...+60 °C
Час відгуку	≤ 10 секунд
Діапазон вологості	0...99% RH (без конденсації)
Розміри	37 × 33 × 12 мм
Вага	~30 г
Особливості	Вбудована стабілізація лазера, фільтрація шуму, компактний корпус

Датчик твердих частинок PMS7003 є одним із найбільш оптимальних рішень для завдань екологічного моніторингу, особливо коли йдеться про мобільні або автономні платформи, такі як БПЛА. Він поєднує високу точність вимірювань PM1.0, PM2.5 та PM10 з компактністю, низьким енергоспоживанням та стійкістю до змін зовнішніх умов. Завдяки активному повітрязабору та швидкому часу відгуку PMS7003 забезпечує стабільні та достовірні дані навіть у русі, що є важливою вимогою при моніторингу з дрона.

Метеорологічні сенсори

Для вимірювання температури та відносної вологості в системі екологічного моніторингу обрано цифровий датчик SHT31(рис. 3.3), який входить до лінійки високоточних сенсорів компанії Sensirion. SHT31 є одним із найсучасніших та найнадійніших датчиків у своєму класі(табл. 3.5), розробленим спеціально для застосувань, де потрібні стабільні, точні та довготривалі вимірювання.[14]

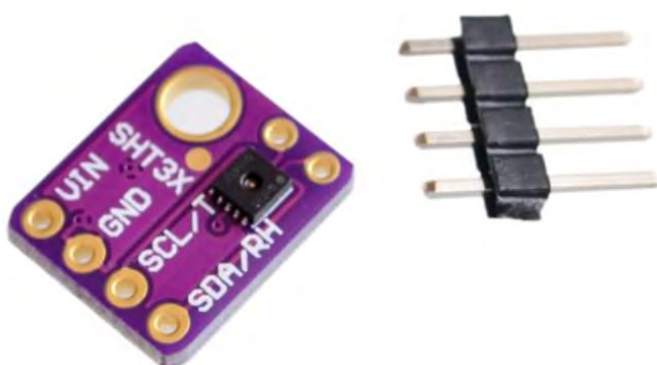


Рисунок 3.3 - Датчик температури та вологості SHT31

Таблиця 3.5. Технічні характеристики датчика температури та вологості SHT31

Параметр	Значення / Опис
Тип сенсора	Цифровий датчик температури та вологості
Вимірювані параметри	Температура, відносна вологість
Діапазон температури	-40...+125 °C
Точність температури	±0.2 °C (у діапазоні 0...+90 °C)
Діапазон вологості	0...100% RH
Точність вологості	±2% RH
Час відгуку	~8 мс
Особливості	Вбудоване калібрування, захист від конденсату, режим нагріву для продувки сенсора
Стійкість до зовнішніх умов	Стійкий до конденсату та забруднень завдяки технології PTFE-мембрани
Розміри	~2.5 × 2.5 × 0.9 мм (у модульних платах - більші)

SHT31 є оптимальним вибором для системи екологічного моніторингу завдяки своїй високій точності, стабільності та надійності роботи в різних умовах довкілля. Датчик має заводське калібрування, працює через цифровий інтерфейс I²C та забезпечує чисті й некорумповані дані, що особливо важливо для мобільних

платформ на зразок БПЛА. Його стійкість до конденсату, пилу та різких змін температури дозволяє отримувати достовірні вимірювання навіть під час польоту, коли параметри середовища динамічно змінюються.

Атмосферний тиск

DPS310(рис. 3.4) - це високоточний цифровий датчик атмосферного тиску та барометричної висоти, розроблений компанією Infineon для застосувань, де важливі мала вага, низьке енергоспоживання та точні вимірювання(табл. 3.6).



Рисунок 3.4 - Датчик атмосферного тиску DPS310

Таблиця 3.6. Технічні характеристики датчика вологості DPS310

Параметр	Значення / Опис
Тип сенсора	Цифровий MEMS-датчик атмосферного тиску та температури
Вимірювані параметри	Атмосферний тиск, температура, висота (обчислювана)
Діапазон вимірювань тиску	300...1200 гПа
Роздільна здатність тиску	до 0.002 гПа
Точність тиску	± 0.06 гПа
Діапазон температури	$-40...+85$ °C
Точність температури	± 0.5 °C
Час відгуку	<50 мс залежно від конфігурації
Стійкість	Компенсація температури, низька чутливість до вібрацій
Особливості	Висока чутливість, низька похибка, можливість роботи в умовах швидких перепадів тиску

DPS310 був обраний для створення екологічної моніторингової системи, оскільки він забезпечує надзвичайно точне вимірювання тиску та висоти, що є критично важливим під час роботи БПЛА. Висота польоту безпосередньо впливає на

коректність екологічних вимірювань (CO_2 , пил, газ), тому наявність точного барометра дозволяє прив'язувати зібрані дані до просторових координат і отримувати більш достовірну картину стану довкілля.

GPS та інерціальна система

Для забезпечення просторової прив'язки екологічних даних, зібраних БПЛА, необхідно використовувати надійні навігаційні модулі, які можуть визначати координати, швидкість та орієнтацію апарата у просторі. У рамках магістерської роботи вибрано комбінацію GPS-модуля (Neo-6M або Neo-M8(табл. 3.7)) та інерціального модуля IMU (MPU-6050 або MPU-9250(табл. 3.8)).

Такий підхід є оптимальним для мобільних екологічних платформ, оскільки дозволяє одночасно забезпечити точну геолокацію, стабілізацію руху та фіксацію просторової орієнтації БПЛА. GPS і IMU необхідні для коректної просторової прив'язки вимірювань, аналізу динаміки руху БПЛА та побудови картографічних моделей.

Таблиця 3.7. Технічні характеристики GPS-модулі Neo-6M / Neo-M8

Параметр	Neo-6M	Neo-M8N
Система навігації	GPS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Точність визначення позиції	~2.5 м	1.5 м (іноді до 0.6 м у режимах SBAS)
Частота оновлення даних	1 Гц	1–10 Гц
Час холодного старту	~27 с	~26 с
Час гарячого старту	~1 с	<1 с
Антенa	Керамічна + роз'єм для підсилення	Керамічна / активна
Особливості	Простота інтеграції, доступність	Висока точність, мульти-GNSS, швидке оновлення

Таблиця 3.8. Технічні характеристики IMU-модулі MPU-6050 / MPU-9250

Параметр	MPU-6050	MPU-9250
Склад IMU	Гіроскоп + акселерометр	Гіроскоп + акселерометр + магнітометр
Кількість осей	6 DOF	9 DOF
Діапазон вимірювань (акселерометр)	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ g	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ g

Параметр	MPU-6050	MPU-9250
Діапазон вимірювань (гіроскоп)	$\pm 250 \dots 2000 \text{ } ^\circ/\text{с}$	$\pm 250 \dots 2000 \text{ } ^\circ/\text{с}$
Діапазон магнітометра	-	$\pm 4800 \text{ } \mu\text{T}$
Частота оновлення	до 1 кГц	до 1 кГц (IMU), 100 Гц (магнітометр)
Точність та шум	Середня	Підвищена, з вищою стабільністю
Особливості	Дуже доступний, надійний у базових задачах	Розширена орієнтація у просторі, сумісний із картографією руху

Комбінація GPS-модуля та IMU забезпечує точну просторову навігацію БПЛА, що є важливим для екологічного моніторингу. GPS (особливо Neo-M8) визначає координати та висоту, фіксуючи місце збору даних, тоді як IMU компенсує рух дрона, враховує його нахили та прискорення, що робить прив'язку сенсорних даних більш точною.

Neo-M8 відзначається високою точністю, підтримкою кількох супутникових систем і швидким оновленням даних, тому стабільно працює навіть під час різких маневрів. Neo-6M також є надійним варіантом, якщо вимоги до точності нижчі.

IMU MPU-6050 та MPU-9250 допомагають визначати орієнтацію дрона та згладжувати вібрації, а модель MPU-9250, завдяки магнітометру та 9 осям вимірювання, забезпечує ще точнішу просторову інформацію.

Підсумкове формування сенсорного набору

На основі проведеного аналізу було сформовано комплекс сенсорів (табл. 3.9), який забезпечує повноцінний, точний і стабільний екологічний моніторинг під час роботи БПЛА. До складу цього набору увійшли датчики для вимірювання газового складу повітря, твердих частинок, метеорологічних параметрів, атмосферного тиску, а також навігаційні модулі для точної просторової прив'язки даних.

Таблиця 3.9. Підсумкове формування сенсорного набору

Категорія сенсора	Модель	Основні параметри, що вимірюються	Причина вибору / роль у системі
Газові сенсори	MH-Z19B	CO ₂ (0–2000 ppm), NDIR, висока точність	Стабільні та точні вимірювання CO ₂ ; низьке

Категорія сенсора	Модель	Основні параметри, що вимірюються	Причина вибору / роль у системі
			енергоспоживання; оптимальний для роботи на БПЛА
Датчики твердих частинок (PM)	PMS7003	PM1.0, PM2.5, PM10	Висока чутливість, швидкий час відгуку, стабільні показники навіть у русі завдяки активному повітрязабору
Метеорологічні сенсори	SHT31	Температура, вологість повітря	Висока точність, захист від конденсату, швидкий відгук, ідеально підходить для польових умов
Барометричні сенсори	DPS310	Атмосферний тиск, температура, барометрична висота	Надточне визначення висоти; критично важливо для прив'язки екологічних даних до висоти польоту
GPS-модуль	Neo-6M / Neo-M8N	Координати, швидкість, висота	Забезпечення просторової прив'язки; Neo-M8N дає високу точність завдяки мульти-GNSS
IMU (інерціальні модулі)	MPU-6050 / MPU-9250	Прискорення, кутові швидкості, орієнтація; (MPU-9250 - також магнітометр)	Компенсація нахилів, вібрацій і руху БПЛА; підвищує точність позиціонування та стабілізацію даних

У підсумку сформований сенсорний комплекс повністю відповідає задачам екологічного моніторингу з використанням БПЛА. Кожен сенсор виконує свою функцію: MH-Z19B вимірює CO₂, PMS7003 контролює пил, SHT31 визначає температуру та вологість, а DPS310 забезпечує точну барометричну висоту. GPS та IMU гарантують правильну просторову прив'язку всіх даних. Разом ці модулі створюють компактну, надійну й точну систему, оптимальну для реалізації автоматизованої системи.

3.3. Структурна схема автоматизованої системи на основі БПЛА

Для забезпечення повноцінного збору, передачі та аналізу екологічних даних необхідно чітко визначити функціональну структуру системи, а також взаємодію між

її основними компонентами. Структурна схема(рис. 3.5) є базовим елементом проектування, оскільки дозволяє наочно відобразити логіку роботи системи, послідовність обробки інформації та роль кожного модуля в загальній архітектурі.

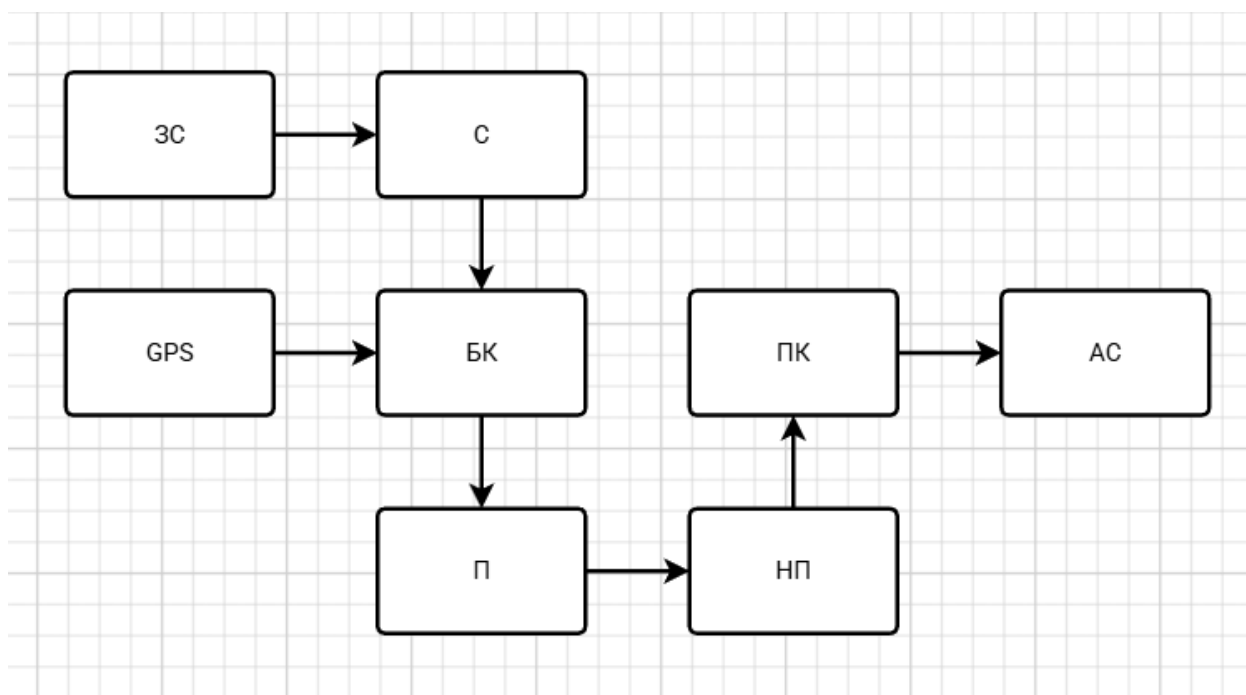


Рисунок 3.5 - Структурна схема автоматизованої системи збору та аналізу даних: ЗС – зовнішнє середовище; С – сенсори; GPS – навігаційний модуль; БК – бортовий комп’ютер; П – передавач; НП – наземний приймач; ПК – комп’ютер оператора; АС – аналітична система.

Зовнішнє середовище(ЗС)

Зовнішнє середовище - це простір польоту БПЛА, з якого отримуються всі екологічні дані. Тут знаходяться вимірювані параметри: концентрації газів, пилові частинки, температура, вологість, тиск і радіаційний фон. Оскільки ці показники змінюються залежно від висоти та місця, їх важливо фіксувати у динаміці з прив’язкою до координат.

Сенсори(С)

Сенсорний модуль збирає первинні дані про стан довкілля. Він перетворює фізичні величини (газовий склад, пил, температуру, вологість тощо) у цифрові сигнали, придатні для подальшої обробки. Усі вимірювання надходять далі у бортовий комп’ютер.

GPS - Навігаційний модуль

GPS надає інформацію про координати, швидкість та висоту БПЛА. Його дані синхронізуються з вимірюваннями сенсорів, щоб прив'язати екологічні параметри до конкретних точок у просторі.

БК - Бортовий комп'ютер

Бортовий комп'ютер збирає дані з сенсорів та GPS, виконує їх первинну фільтрацію, зберігає і формує пакети для передачі. Саме БК координує роботу всіх бортових модулів і передає інформацію на землю через передавач.

П - Передавач

Передавач відправляє сформовані пакети даних на наземну станцію. Передача може здійснюватися в реальному часі по радіоканалу, Wi-Fi або іншому доступному протоколу. Його основна задача - забезпечити стабільний канал зв'язку.

НП - Наземний приймач

Це пристрій, який отримує передані з повітря дані. Він декодує сигнали та передає інформацію на комп'ютер оператора. Робота приймача залежить від якості зв'язку, дальності та умов місцевості.

ПК - Комп'ютер оператора

ПК отримує дані від наземного приймача, виконує їх первинну обробку та передає у аналітичну систему. На комп'ютері оператор може переглядати маршрути, параметри польоту, телеметрію та попередні вимірювання в реальному часі.

АС - Аналітична система

Аналітичний модуль виконує глибоку обробку отриманих екологічних даних: фільтрацію, агрегацію, побудову графіків, карт, теплових зон, аналіз трендів та формування звітів. Саме цей елемент дозволяє перейти від сирих значень до готових висновків про стан довкілля.

Структурна схема автоматизованої системи збору та аналізу даних про параметри довкілля з використанням БПЛА демонструє логічну послідовність обробки інформації - від моменту її вимірювання у реальних умовах до отримання готових аналітичних результатів. Запропонована архітектура забезпечує повний цикл роботи системи: сенсорний комплекс на борту безпілота здійснює первинне вимірювання параметрів, бортовий комп'ютер виконує їх попередню обробку та

синхронізацію з координатами, а канал зв'язку гарантує надійну передачу даних на наземну станцію.

Подальша обробка та збереження отриманої інформації на ПК оператора й у аналітичній системі дає можливість формувати точні висновки про стан довкілля, будувати просторові карти, виявляти відхилення та тенденції. Така структурна організація підвищує точність, оперативність і надійність екологічного моніторингу, роблячи систему гнучкою, масштабованою та придатною для застосування в різних умовах і сценаріях.

3.3. Проектування каналу передачі даних (радіоканал, Wi-Fi, LTE, LoRa тощо)

Ефективність роботи автоматизованої системи збору та аналізу даних значною мірою залежить від правильно спроектованого каналу передачі інформації (табл. 3.10). Оскільки безпілотний літальний апарат виконує вимірювання у динамічних умовах, канал зв'язку має забезпечувати стабільну передачу екологічних параметрів у режимі реального часу або з мінімальною затримкою.

Таблиця 3.10. Порівняння технологій каналів передачі даних для БПЛА

Параметр / Технологія	Радіоканал (433/868 МГц)	Wi-Fi (2.4/5 ГГц)	LTE / 4G / 5G	LoRa / LoRaWAN
Дальність зв'язку	5–20 км	100–500 м	Практично необмежена (зона покриття)	10–20 км
Швидкість передачі	9.6–500 кбіт/с	10–300 Мбіт/с	5–50 Мбіт/с	0.3–50 кбіт/с
Енергоспоживання	Низьке	Високе	Високе	Дуже низьке
Стійкість до завад	Висока	Низька	Висока	Висока
Затримка (latency)	20–150 мс	<10 мс	10–40 мс	200–1500 мс
Потреба в інфраструктурі	Немає	Немає	Потрібна мобмережа	Може бути потрібен шлюз

Параметр Технологія	Радіоканал (433/868 МГц)	Wi-Fi (2.4/5 ГГц)	LTE / 4G / 5G	LoRa LoRaWAN
Придатність для БПЛА	Телеметрія, управління	Відео, великі масиви даних	Хмарні обчислення, великі обсяги	Сенсори низької швидкості
Надійність каналу	Висока	Середня	Висока	Висока
Ключова перевага	Найстабільні ший канал на відстань	Найвища швидкість	Найбільший радіус дії	Низька енергозатратн ість
Ключовий недолік	Низька пропускна здатність	Дуже мала дальність	Залежність від оператора	Дуже низька швидкість

Порівняння технологій показує, що кожен канал зв'язку має свої сильні та слабкі сторони. Радіоканал є надійним і дальнобійним, але має обмежену швидкість. Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність, проте працює лише на короткій дистанції. LTE/4G/5G поєднує високу швидкість і велику дальність, але залежить від покриття та споживає більше енергії. LoRa вирізняється дуже низьким енергоспоживанням і великою дальністю, але передає невеликі обсяги даних.

Формули оцінки передачі даних

Для обґрунтованого вибору технології зв'язку та розрахунку її ефективності необхідно не лише порівняти технічні характеристики різних каналів, а й виконати математичну оцінку їхніх параметрів. Розрахунки дають можливість змоделювати реальні умови експлуатації, передбачити можливі обмеження каналу та обрати найбільш оптимальну технологію передачі даних для системи екологічного моніторингу.

1. Пропускна здатність каналу (формула Шеннона–Хартлі)

Формула визначає теоретичну максимальну швидкість передачі даних, яку може забезпечити канал при заданій ширині смуги та співвідношенні сигнал/шум:

$$C = B \log_2(1 + SNR), \quad (3.1)$$

де C - максимально можлива швидкість (біт/с), B - ширина смуги пропускання (Гц), SNR - відношення сигнал/шум.

Чим вища смуга пропускання та більший SNR, тим більшою буде пропускна здатність. Формула дозволяє оцінити потенціал каналу й зрозуміти, чи достатньо його ресурсу для конкретних задач - наприклад, передачі телеметрії, потокових сенсорних даних або відео.

2. Втрати у вільному просторі (Free Space Path Loss, FSPL)

Для бездротового зв'язку над відкритою територією важливо оцінити, наскільки сигнал ослаблюватиметься з відстанню:

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44, \quad (3.2)$$

де d - відстань між передавачем і приймачем (км), f - частота сигналу (МГц).

FSPL показує, як сильно «розсіюється» енергія сигналу під час поширення. Чим вища частота та більша відстань - тим більші втрати. Це пояснює, чому радіоканали 433/868 МГц працюють на більші відстані, ніж Wi-Fi на 2.4/5 ГГц.

3. Рівень прийнятої потужності

Для перевірки, чи сигнал взагалі може бути прийнятий, використовується рівняння балансу потужностей:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - FSPL - L, \quad (3.3)$$

де P_{tx} - потужність передавача, G_{tx} та G_{rx} - коефіцієнти підсилення антен, L - додаткові втрати (кабелі, вологі, перешкоди).

Якщо отриманий рівень P_{rx} менший за чутливість приймача - зв'язку не буде. Ця формула дозволяє визначити максимальну робочу дальність.

4. Енергоспоживання модуля зв'язку

Енергоспоживання є критично важливим параметром для БПЛА, де автономність роботи обмежена. Потужність розраховується як:

$$P = U \cdot I, \quad (3.4)$$

де U - напруга живлення, I - споживчий струм.

Енергію за певний час можна розрахувати наступним чином:

$$E = P \cdot t, \quad (3.5)$$

Ці формули дозволяють порівняти енергетичну ефективність різних технологій. До прикладу, LoRa споживає у 5–10 разів менше енергії, ніж LTE чи Wi-Fi.

5. Дальність зв'язку в низькошвидкісних мережах (приклад для LoRa)

Для LoRa та схожих технологій використовується спрощена формула оцінки максимальної дальності:

$$d_{max} \approx \frac{\lambda}{4\pi} \cdot 10^{\frac{P_{tx} - S_{sens}}{20}}, \quad (3.6)$$

де λ - довжина хвилі, S_{sens} - чутливість приймача, P_{tx} - потужність передавача.

Ця модель показує, що LoRa здатна забезпечувати зв'язок на десятки кілометрів навіть при низькій потужності передавача.

6. Затримка (latency) у каналі

При проєктуванні систем, що працюють у режимі реального часу, важливо враховувати часові затримки:

$$t_{latency} = t_{processing} + t_{queue} + t_{transmission} + t_{propagation}, \quad (3.7)$$

де $t_{processing}$ - обробка на модулі, t_{queue} - очікування в черзі, $t_{transmission}$ - затримка передачі кадру, $t_{propagation}$ - затримка поширення сигналу.

Цей показник особливо важливий для LTE та Wi-Fi.

Формули, наведені у підрозділі, дозволяють комплексно оцінити можливості каналу передачі даних для БПЛА в різних умовах. Завдяки таким розрахункам можна точно визначити допустиму дальність, необхідну потужність передавача, стабільність зв'язку, очікувану швидкість передачі та рівень енергоспоживання. Це забезпечує обґрунтований вибір технології та підвищує надійність усієї автоматизованої системи моніторингу.

3.5. Алгоритм збору, обробки та збереження даних

Блок-схема(рис. 3.6) алгоритму відображає повну послідовність дій, які виконує автоматизована система моніторингу довкілля під час роботи безпілотного літального апарата. Вона включає всі ключові етапи - від первинної ініціалізації сенсорів і контролю системи до аналізу отриманої інформації та збереження результатів у базі даних.

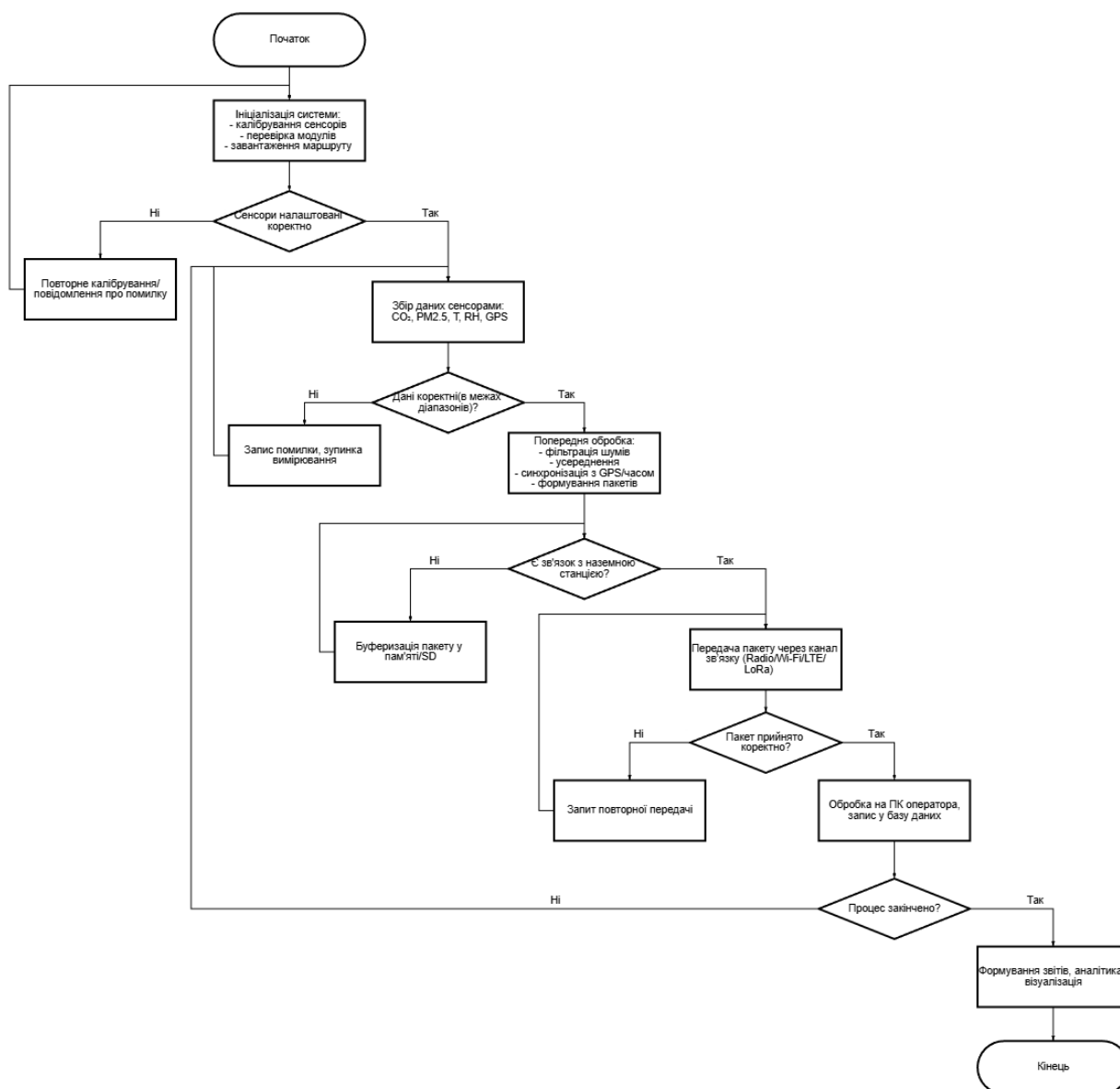


Рисунок 3.6 - Блок-схема алгоритму збору, обробки та збереження даних

Алгоритм має кілька логічних гілок, що забезпечують перевірку коректності вимірювань, працездатності сенсорів і стабільності каналу зв'язку. Така структура дозволяє системі працювати надійно навіть у складних умовах і мінімізувати можливість втрати інформації.

1. Початкова ініціалізація системи

На першому етапі БПЛА виконує автоматичну перевірку всіх сенсорів і модулів. Відбувається калібрування вимірювальних каналів, завантаження маршруту польоту, встановлення з'єднання із наземною станцією та первинне налаштування інтерфейсів.

У разі виявлення несправностей алгоритм переходить до гілки «ні», де передбачено повторне калібрування або формування повідомлення про помилку.

2. Збір даних сенсорним комплексом

Після успішної ініціалізації система переходить до активного збору даних. Сенсори вимірюють концентрацію CO₂, рівень частинок PM2.5, температуру, вологість та отримують координати GPS. Усі значення надходять до бортового комп'ютера.

Далі виконується перевірка коректності отриманих значень. Якщо дані містять помилки, вони відкидаються і в лог записується відповідний запис. Якщо ж значення відповідають допустимим межах - алгоритм продовжується.

3. Попередня обробка даних на борту

На цьому етапі бортовий комп'ютер виконує базову обробку: фільтрацію шумів, згладжування та усереднення, синхронізацію показників з часовими мітками та координатами, формування структурованих пакетів.

Після цього виконується перевірка наявності каналу зв'язку. Якщо зв'язок відсутній, дані тимчасово буферизуються у пам'яті або на SD-карті - це дозволяє уникнути їх втрати.

4. Передача даних каналом зв'язку

Якщо канал доступний, телеметричні пакети передаються через один із обраних протоколів: радіоканал, Wi-Fi, LTE або LoRa. Передача супроводжується перевіркою цілісності пакету на стороні приймача за допомогою CRC-контролю. У разі помилки алгоритм переходить до гілки «ні» і ініціює повторну передачу даних.

5. Приймання та обробка даних на наземній станції

Коректно отримані пакети надходять до наземної станції, де виконуються: декодування та розпакування, перевірка часових міток, реєстрація телеметрії, передача інформації на ПК оператора.

Отримані дані відображаються у вигляді таблиць, графіків чи картографічних елементів у режимі реального часу.

6. Збереження у базі даних

Після обробки дані передаються до бази даних. Кожен запис містить: значення вимірювань, координати, час зчитування, службову інформацію.

Таке структурування забезпечує подальший пошук, фільтрацію та аналітику даних у зручному форматі.

7. Аналіз результатів і завершення місії

Після завершення місії виконується глибший аналіз зібраних даних. Створюються теплові карти, графіки та підсумкові звіти, які можуть бути експортовані у формат PDF, Excel або PNG.

Якщо місія не завершена, алгоритм повертається до етапу збору даних, забезпечуючи циклічну роботу системи.

Висновок

Блок-схема демонструє структурований та логічно побудований алгоритм роботи системи моніторингу, де кожний етап має чітке призначення та контролюється за допомогою умовних операторів «так/ні». Завдяки такій організації система здатна надійно збирати екологічні показники, коректно обробляти їх та зберігати в оптимізованому форматі для подальшої аналітики та прийняття управлінських рішень.

3.6. Системне та прикладне програмне забезпечення (інтерфейс користувача, база даних, візуалізація результатів)

Система взаємодіє з різними типами сенсорів, комунікаційними модулями та пристроями БПЛА, програмне забезпечення повинно забезпечувати стабільний прийом даних, надійне їх збереження та зручний доступ користувача до результатів аналізу. Програмно-апаратна частина включає як системні компоненти (табл. 3.10), що забезпечують роботу обладнання, так і прикладні модулі, орієнтовані на оператора та аналітичні задачі.

Таблиця 3.10. Компоненти системного та прикладного програмного забезпечення

Компонент ПЗ	Тип	Опис функцій	Технології / Інструменти
Бортове програмне забезпечення БПЛА	Системне	Збір даних сенсорів, фільтрація, передача по каналу, логування	C/C++, MicroPython, FreeRTOS, ESP-IDF, Raspberry Pi OS
Модуль передачі даних	Системне	Формування пакетів, контроль втрат, підтримка LoRa/Wi-Fi/LTE	LoRaWAN stack, MQTT, TCP/UDP
Приймальний модуль наземної станції	Системне	Прийом даних, перевірка цілісності, тимчасова буферизація	Python, Node.js, Serial API, Socket сервер
Серверна частина Backend	Прикладне	Аналітична обробка, управління БД, API для UI	Django / Flask / FastAPI, Node.js, REST, WebSocket
База даних (центральне сховище)	Системне/ Прикладне	Зберігання усіх вимірювань, маршрутів, логів	PostgreSQL, MongoDB, InfluxDB
Модуль візуалізації даних	Прикладне	Побудова графіків, карт, 3D-треків	Plotly, Grafana, Matplotlib, Folium, QGIS
Інтерфейс оператора (UI)	Прикладне	Відображення даних у реальному часі, карта БПЛА, звіти	React, Vue, PyQt5, Dash, HTML/CSS
Модуль генерації звітів	Прикладне	Створення PDF-звітів, підсумкових таблиць і графіків	ReportLab, LaTeX, Python PDF API
Модуль контролю стану системи	Системне	Моніторинг втрат пакетів, стану сенсорів, телеметрії	Prometheus, системні логи, Health-check API

Аналіз компонентів програмного забезпечення показує, що система має чітку модульну структуру, де кожен елемент виконує свою функцію та забезпечує безперервний цикл збору, передачі, зберігання й аналізу екологічних даних.

Бортове програмне забезпечення відповідає за первинний збір та обробку даних на БПЛА, що дозволяє мінімізувати затримки та забезпечити стабільність у польових умовах. Модуль передачі даних гарантує надійність комунікації та адаптивність системи до різних каналів зв'язку.

Приймальний модуль і серверна частина виконують ключові операції з перевірки, очищення та аналітичної обробки даних, забезпечуючи їх коректне збереження у базі даних. Сама база даних виступає надійним сховищем, оптимізованим для роботи з великими масивами сенсорної інформації.

Прикладні модулі - інтерфейс оператора, візуалізація та формування звітів - забезпечують зручність та доступність даних для користувачів, дозволяючи швидко оцінювати стан довкілля та приймати рішення на основі наочних графіків та картографічних матеріалів.

Таким чином, усі компоненти програмного забезпечення взаємодіють як цілісна система, що забезпечує надійну, гнучку та ефективну роботу автоматизованої платформи моніторингу довкілля на базі БПЛА.

Висновок

У третьому розділі було сформовано загальну архітектуру автоматизованої системи моніторингу довкілля на базі БПЛА та показано, що вона має модульну будову: безпілотник із сенсорним комплексом, канали зв'язку, наземна станція, серверна та аналітична частини. Така структура забезпечує повний цикл роботи - від вимірювання параметрів у реальних умовах до їх збереження, обробки та візуалізації.

Обґрунтований вибір сенсорів (MH-Z19B, PMS7003, SHT31, DPS310, GPS та IMU) дозволяє отримувати точні й стабільні екологічні дані з просторовою прив'язкою до координат і висоти польоту. Аналіз варіантів каналів передачі (радіоканал, Wi-Fi, LTE, LoRa) показав, що для різних сценаріїв доцільно комбінувати технології, враховуючи компроміс між дальністю, швидкістю та енергоспоживанням.

Запропонований алгоритм збору, обробки та збереження даних, а також програмне забезпечення з базою даних, інтерфейсом користувача та модулями візуалізації забезпечують надійну, безперервну роботу системи та зручний доступ до результатів моніторингу. У цілому, даний розділ демонструє, що запропонована

система є технічно обґрунтованою, гнучкою та придатною до практичної реалізації в задачах екологічного моніторингу.

4. МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ПРОЦЕСІВ МОНІТОРИНГУ

4.1. Постановка задачі моделювання

Метою моделювання є відтворення роботи автоматизованої системи збору та аналізу екологічних даних з використанням БПЛА в умовах, максимально наближених до реальних. Така система включає не лише сам безпілотний літальний апарат, а й сенсорний модуль, канал зв'язку, наземну станцію, програмні засоби обробки та візуалізації інформації. Тому задача моделювання є комплексною і охоплює одразу кілька підсистем, які взаємодіють між собою.

У рамках даної магістерської роботи моделювання проводиться з такими основними цілями:

- перевірити працездатність запропонованої архітектури системи екологічного моніторингу на базі БПЛА;
- оцінити точність та стабільність руху БПЛА під час виконання місії моніторингу;
- проаналізувати вплив похибок сенсорів, шумів та завад у каналі зв'язку на якість отримуваних даних;
- дослідити ефективність алгоритмів обробки та візуалізації результатів (фільтрація, інтерполяція, побудова карт).

З огляду на це, задача моделювання формулюється як побудова узгодженого набору моделей, які описують:

Рух БПЛА при виконанні місії моніторингу.

Необхідно змодельовати траєкторію польоту безпілота з урахуванням:

- заданих маршрутів (прямолінійний політ, “змійка”, рух через контрольні точки, складні 3D-траєкторії);
- впливу вітру та зовнішніх збурень;

- обмежень по швидкості та висоті;
- роботи простого алгоритму waypoint-навігації (рух до послідовності контрольних точок).

Процес збору даних із сенсорів.

Потрібно змодельовати роботу сенсорів CO₂ (MH-Z19B), PM2.5 (PMS7003), температури та вологості (SHT31) з урахуванням:

- випадкових шумових похибок;
- вібраційних завад під час польоту БПЛА;
- дискретності вимірювань (обмежена частота оновлення);
- інерційності та затримки відгуку;
- можливих пропусків вимірювань.

Процес передачі даних між БПЛА та наземною станцією.

У моделі необхідно відтворити:

- формування пакетів даних (службова інформація, часові мітки, корисні вимірювання, контрольна сума);
- вплив радіоканалу: шуми, втрати пакетів, затримки, обмеження пропускної здатності;
- приймання, перевірку цілісності (CRC), відбракування пошкоджених пакетів;
- відновлення часових рядів після втрат та нерівномірного надходження даних.

Алгоритми обробки та візуалізації екологічних даних.

Після моделювання збору й передачі даних необхідно:

- виконати фільтрацію сигналів (медіанний фільтр, ковзне середнє, низькочастотна фільтрація);
- виконати інтерполяцію пропусків (лінійна, сплайн-інтерполяція, метод найближчого сусіда);
- здійснити просторову інтерполяцію (IDW, Kriging) для побудови карт забруднення;
- відобразити результати у вигляді теплових карт, ізоліній та траєкторій польоту БПЛА на карті.

Вибір і узгодження програмних середовищ моделювання.

Оскільки система включає як апаратні, так і програмні компоненти, задача моделювання передбачає:

- використання MATLAB/Simulink для побудови математичних моделей руху БПЛА, сенсорів та каналу зв'язку;
- застосування спеціалізованих toolbox-ів (Communications, Sensor Fusion, Statistics) для моделювання зв'язку, шумів та обробки сигналів;
- використання середовищ Gazebo/AirSim для 3D-симуляції польоту та впливу зовнішніх факторів;
- застосування Python (NumPy, Pandas, Matplotlib, scikit-learn) для додаткової аналітики, перевірки алгоритмів обробки та візуалізації;
- використання GIS-інструментів (QGIS) для картографічної прив'язки даних і побудови карт забруднення;
- моделювання інтеграції компонентів системи за допомогою ROS.

Окремим аспектом задачі моделювання є візуальне відтворення конструкції БПЛА.

Створення 3D-моделі дрона в середовищі Blender дозволяє:

- перевірити розміщення сенсорів та електроніки на корпусі;
- оцінити вплив компоновки на можливі вібрації та напрямок повітряного потоку;
- підготувати платформу до подальших CFD-досліджень та фізичної реалізації.

Узагальнюючи, постановка задачі моделювання полягає у розробленні взаємопов'язаних моделей руху БПЛА, роботи сенсорів, передачі даних та їх обробки в обраних програмних середовищах. Очікуваним результатом є можливість:

- відтворити повний цикл роботи системи - від польоту дрона до появи карти забруднення;
- оцінити чутливість системи до шумів, завад та втрат даних;
- сформулювати рекомендації щодо параметрів польоту, конфігурації сенсорів, налаштувань каналу зв'язку та алгоритмів обробки для подальшої реалізації системи в реальних умовах.

4.2. Вибір середовища та інструментів для моделювання

Для ефективного проведення моделювання автоматизованої системи збору та аналізу екологічних даних необхідно правильно обрати програмні середовища та інструменти, які забезпечують можливість комплексного аналізу як сенсорних сигналів, так і механіки польоту, каналів зв'язку та конструктивних елементів БПЛА. Для роботи може бути представлена низка програмних продуктів, серед яких MATLAB/Simulink, Python, Scopes, Proteus та інші середовища, здатні забезпечити моделювання різних компонентів системи.

Табл. 4.1 представляє інструменти для моделювання та описує, яку саме роль вони відіграють у моделюванні.

Таблиця 4.1. Вибір середовища та інструментів для моделювання

Середовище / інструмент	Призначення в моделюванні	Причини вибору	Переваги	Обмеження / недоліки
MATLAB	Чисельне моделювання, аналіз даних, побудова графіків	Широкі можливості для обробки сигналів і математичного моделювання	Потужні бібліотеки, зручний синтаксис, інтеграція з Simulink	Платна ліцензія
Simulink	Моделювання систем у вигляді блок-схем, імітація каналів зв'язку та сенсорів	Оптимальний інструмент для моделювання динамічних систем БПЛА	Візуальність, моделювання в реальному часі, велика кількість блоків	Потребує добре структурованої моделі
MATLAB Communications Toolbox	Моделювання радіоканалів, завад, кодеків	Необхідний для реалістичної імітації передачі даних	Готові моделі AWGN, fading, packet loss	Може бути складним для новачків
Sensor Fusion and Tracking Toolbox	Моделювання роботи сенсорів, фільтрація, шумові моделі	Легко будувати моделі датчиків CO ₂ , PM2.5, SHT31	Висока точність, можливість комбінування розмаїтих сенсорів	Додатковий пакет MATLAB
Curve Fitting / Statistics Toolbox	Аналіз часових рядів, апроксимація, фільтрація	Потрібні для обробки даних після передачі	Широкі можливості статистичного аналізу	Обмежені можливості реального часу
MATLAB Function Blocks у Simulink	Реалізація алгоритмів кодування/декодування пакетів	Гнучкість і можливість програмування власних моделей	Дозволяє створювати індивідуальні блоки	Потрібні навички MATLAB-програмування

Середовище інструмент	Призначення в моделюванні	Причини вибору	Переваги	Обмеження / недоліки
Scopes / Time Scope / XY Graph	Візуалізація результатів моделювання	Зручність аналізу сигналів під час симуляції	Миттєва оцінка сигналів та їх змін	Обмежена гнучкість порівняно з MATLAB-графіками
Google Colab / Python (опційно)	Перевірка алгоритмів обробки поза MATLAB	Безкоштовна альтернатива для тестування	Відкритий код, NumPy, Pandas, Matplotlib	Не підходить для динамічних блоків
GIS-інструменти (QGIS)	Візуалізація маршруту БПЛА та просторових даних	Застосовується для картографічної прив'язки	Безкоштовний, підтримка багатьох форматів	Не моделює динаміку руху

Наведена таблиця показує, що оптимальним вибором для моделювання є поєднання MATLAB і Simulink, оскільки вони забезпечують як математичний аналіз, так і наочне моделювання динамічних процесів. Використання додаткових toolbox-ів дозволяє реалістично відтворити роботу сенсорів та каналу зв'язку, що підвищує точність дослідження.

Використання кожного інструменту в моделюванні

Оскільки система включає як апаратні, так і програмні компоненти, вона потребує комплексного підходу, що поєднує 3D-симуляцію, математичне моделювання, аналіз даних та інтеграцію у єдиному середовищі. Нижче наведено узагальнену таблицю 4.2, яка демонструє, які саме задачі покладені на кожне програмне забезпечення та чому саме ці інструменти були обрані для моделювання системи.

Таблиця 4.2. Використання кожного інструменту в моделюванні

Компонент системи	Що моделюється	Використані інструменти	Обґрунтування вибору
БПЛА	Динаміка руху, стабілізація, вплив вітру, траєкторії	Gazebo, AirSim	Реалістична фізична симуляція; наявність готових моделей квадрокоптерів; можливість зміни погодних умов і параметрів середовища.
Сенсори CO ₂ (MH-Z19B)	Формування показників CO ₂ , вплив шумів, затримка відгуку	MATLAB, Simulink	Можливість детального математичного моделювання, робота з шумами, фільтрами та часовими рядами.

Компонент системи	Що моделюється	Використані інструменти	Обґрунтування вибору
Сенсор пилу PM2.5 (PMS7003)	Генерація концентрації частинок, шумові компоненти, випадкові сплески	MATLAB, Simulink, Python (для аналізу)	Гнучка побудова моделей шуму, можливість тестувати різні сценарії забруднення повітря.
Датчик температури та вологості SHT31	Вимірювання температури/вологості, інерційність, похибки	MATLAB	Наявність інструментів для фільтрації та апроксимації сенсорних сигналів.
Канал зв'язку	Затримки, втрати пакетів, завади, пропускна здатність (Wi-Fi/LoRa/LTE)	MATLAB Communications Toolbox	Дозволяє моделювати реальні комунікаційні процеси, враховувати AWGN, jitter та нестабільність каналу.
Обробка даних	Фільтрація, згладження, компенсація шумів, агрегація	MATLAB, Python (NumPy, SciPy)	Можливість порівняння різних алгоритмів та вибір оптимальних.
Аналітика та візуалізація	Побудова графіків, спектрів, статистичних моделей	Python (Pandas, Matplotlib, Plotly)	Зручний аналіз великих наборів даних та швидка побудова інформативної графіки.
Прогнозування та моделі МН	Прогноз рівня забруднення, тренди	Python (scikit-learn)	Можливість машинного навчання та порівняння моделей.
Інтеграція системи	Передача даних між модулями, синхронізація потоків, моделювання реальної архітектури	ROS (Robot Operating System)	Стандарт у робототехніці, дозволяє повністю відтворити структуру реальної системи БПЛА.
Наземна станція	Приймання даних, відображення інформації, передача команд	Python, ROS, інколи MATLAB GUI	Дозволяє змоделювати інтерфейс оператора та процес взаємодії з БПЛА.

Вибір інструментів моделювання показує, що кожне середовище виконує свою роль і доповнює інші. Gazebo та AirSim відповідають за 3D-симуляцію польоту, MATLAB/Simulink - за математичне моделювання сенсорів і зв'язку, Python - за аналітику та тестування алгоритмів, а ROS інтегрує всі компоненти системи.

Візуальне моделювання структури БПЛА

Конструктивне моделювання БПЛА є ключовим етапом розроблення системи екологічного моніторингу, адже від правильної компоновки залежить якість вимірювань і надійність роботи. FPV-дрони (рис. 4.1) часто використовуються як базова платформа завдяки модульності, простому обслуговуванню та можливості адаптації під різні задачі. Типовий FPV-дрон містить раму, пластини, промені, мотори

У рамках даної магістерської дисертації виникла потреба у створенні не лише аналітичної, але й візуальної моделі дрона, яка б точно відображала конструктивні особливості платформи, використовуваної для екологічного моніторингу. З цією метою було виконано 3D-моделювання(рис. 4.2) у середовищі Blender[29] - сучасному інструменті, який дозволяє поєднати точність технічного моделювання та високий рівень графічної деталізації. Під час створення моделі було підібрано максимально компактні розміри, розміщення компонентів всередині дрона, аби забезпечити легкий доступ до будь якої місцевості.



Рисунок 4.2 - Візуалізація дрона у середовищі Blender

Особливу увагу приділено геометрії корпусу та силової частини дрона, оскільки саме ці елементи визначають можливість безпечного та стабільного розміщення вимірювального обладнання. Створена у Blender модель відображає не тільки зовнішній вигляд апарата, але й логіку побудови його конструкції: форму рами, механіку рухомих елементів, положення моторів, компоновку електроніки та динаміку розміщення датчиків.

Таким чином, виконане 3D-моделювання є повноцінним етапом проектування апаратної частини системи, оскільки дозволяє оцінити сумісність компонентів, перевірити конструктивні рішення та підготувати платформу до інтеграції екологічних датчиків і подальшого польотного моделювання.

4.3. Математична модель руху БПЛА при виконанні місії моніторингу

Під час виконання місії екологічного моніторингу БПЛА повинен рухатися за наперед заданим маршрутом, проходити контрольні точки, утримувати потрібну висоту та швидкість, а також компенсувати вплив зовнішніх збурень, таких як вітер. Щоб коректно змодельовати весь процес польоту, потрібна математична модель руху апарата, яка описує зміну його положення та орієнтації у часі.

1. Вибір систем координат

Для опису руху використовуються дві системи координат:

- Інерціальна (земна) система (O, X, Y, Z) - пов'язана з поверхнею Землі; у ній зручно описувати траєкторію польоту та розташування контрольних точок.
- Корпусна система (O_b, x_b, y_b, z_b) - пов'язана безпосередньо з корпусом БПЛА; у ній визначаються сили тяги, моменти від двигунів тощо.

Положення центру мас БПЛА в інерціальній системі описується вектором:

$$r(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ h(t) \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

де

$x(t)$, $y(t)$ - координати у горизонтальній площині, $h(t)$ - висота польоту.

Орієнтація апарата може описуватися кутами Ейлера (крен φ , тангаж θ , рискання ψ), однак для задач маршрутування та моніторингу зазвичай достатньо відстежувати курс $\psi(t)$, оскільки саме він визначає напрямок руху над поверхнею.

2. Спрощена кінематична модель руху у горизонтальній площині

Для моделювання місії моніторингу приймається, що автопілот уже забезпечує стабілізацію по крену й тангажу, а БПЛА рухається із заданою повітряною швидкістю $V(t)$ та курсом $\psi(t)$. Тоді кінематичні рівняння в інерціальній системі мають вигляд:

$$\frac{dx}{dt} = V(t) \cos \psi(t) + \omega_x, \quad (4.2)$$

$$\frac{dy}{dt} = V(t) \sin \psi(t) + \omega_y, \quad (4.3)$$

$$\frac{dh}{dt} = u_h(t), \quad (4.4)$$

Де

- $V(t)$ - модуль горизонтальної швидкості БПЛА;
- $\psi(t)$ - курс (кут напрямку руху відносно осі X);
- ω_x, ω_y - проєкції швидкості вітру по осях X та Y;
- $u_h(t)$ - керуючий вплив по висоті (набір/зниження).

В даному випадку БПЛА описується як «точку», яка рухається по поверхні, але з урахуванням вітру та зміни висоти. Такої моделі достатньо, щоб змодельовати політ по маршруту і подивитися, як дрон відхиляється від ідеальної траєкторії при наявності бокового вітру або неправильно обраної швидкості.

3. Модель проходження контрольних точок

Маршрут місії задається у вигляді послідовності контрольних точок:

$$r_{\omega p}^{(i)} = \begin{bmatrix} x_{\omega p}^{(i)} \\ y_{\omega p}^{(i)} \\ h_{\omega p}^{(i)} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (4.5)$$

На кожному кроці моделювання БПЛА «бачить» поточну цільову точку $r_{\omega p}^{(i)}$ і повинен коригувати курс так, щоб наближатися до неї. Вектор похибки за положенням:

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_x(t) \\ e_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\omega p}^{(i)} - x(t) \\ y_{\omega p}^{(i)} - y(t) \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

За цим вектором визначається бажаний курс:

$$\psi_{des}(t) = \text{atan2}(e_y(t), e_x(t)), \quad (4.7)$$

Кутовий поворот до бажаного курсу можна задати простим пропорційним законом:

$$\frac{d\psi}{dt} = k_{\psi}(\psi_{des}(t) - \psi(t)), \quad (4.8)$$

де k_{ψ} - коефіцієнт пропорційного регулятора по курсу.

Ідея полягає у наступному: дрон «дивиться», де знаходиться поточна цільова точка, обчислює кут напрямку до неї і повертається у цей бік. Якщо обрати коефіцієнт k_{ψ} занадто великим - дрон буде «смикатись», якщо замалим - повільно реагуватиме на зміну траєкторії.

4. Обмеження за швидкістю та висотою

Для місій моніторингу важливо не тільки потрапити в потрібні точки, але й дотримуватися обмежень:

- мінімальна та максимальна швидкість:

$$V_{min} \leq V(t) \leq V_{max} \quad (4.9)$$

- робочий діапазон висот:

$$h_{min} \leq h(t) \leq h_{max} \quad (4.10)$$

На практиці це реалізується через насичення (saturation) керуючих сигналів:

$$V_{cmd} = sat(V_{ref}, V_{min}, V_{max}), \quad (4.11)$$

$$h_{cmd} = sat(h_{ref}, h_{min}, h_{max}), \quad (4.12)$$

де V_{ref}, h_{ref} - бажані значення швидкості та висоти.

Цими обмеженнями можна захистити модель від нереалістичних режимів, наприклад, коли розрахунок вимагає занадто великої швидкості або нульової висоти. Це важливо, бо інакше в моделюванні дрон може полетіти «під землю» або розігнатися до нереальних значень.

5. Облік впливу вітру в моделі

Вітер є одним із основних зовнішніх чинників, що впливають на траєкторію БПЛА. У спрощеному вигляді його враховано через додаткові складові w_x, w_y у рівняннях:

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \psi + \omega_x, \quad \frac{dy}{dt} = V \sin \psi + \omega_y \quad (4.13)$$

Якщо $\omega_x = \omega_y = 0$, маємо ідеальний випадок польоту «без вітру». При ненульових значеннях вітер зсуває траєкторію і дозволяє проаналізувати, наскільки добре обрана стратегія керування компенсує ці збурення.

Висновок:

Обрана математична модель є спрощеною, але достатньою для задач екологічного моніторингу. Вона дозволяє описати траєкторію БПЛА у просторі, врахувати вплив вітру та базових обмежень по швидкості й висоті, а також реалізувати простий, зрозумілий алгоритм руху між контрольними точками. При необхідності ця модель може бути розширена додаванням повної динаміки (крен, тангаж, ролання), детальних аеродинамічних рівнянь і більш складних регуляторів, але для цілей даної роботи її точності є цілком достатньо.

Візуалізація траєкторій руху БПЛА

У середовищі MATLAB[16] був розроблений код, за допомогою якого, було відображено 5 типів траєкторій:

- прямолінійний політ з коливанням висоти;
- «змійка» для моніторингу поля;
- політ через контрольні точки (waypoints);
- складна 3D-траєкторія з підйомами/спусками;
- порівняння траєкторій без вітру та з боковим вітром.

Рисунок 4.3 демонструє базову модель руху БПЛА при прямолінійному польоті. Траєкторія змінюється переважно по осі X , тоді як відхилення по Y майже відсутні. При цьому висота (Z) коливається за синусоїдальним законом - таку модель часто використовують для тестування стабілізації висоти, впливу легких поривів вітру або недосконалостей регулятора.

3D Trajectory of UAV (Straight Flight)

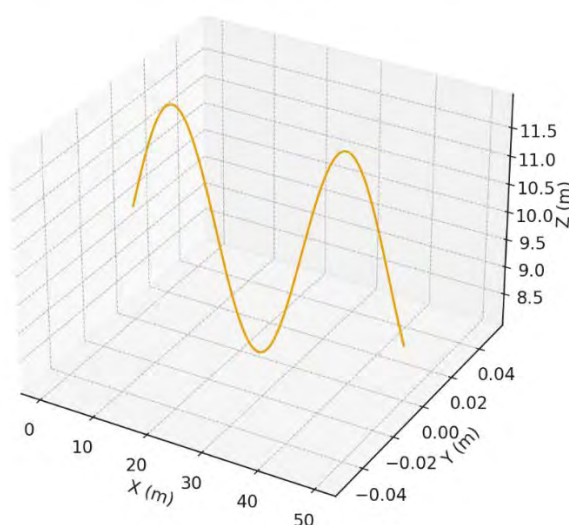


Рисунок 4.3 - Просторова траєкторія руху БПЛА під час прямолінійного польоту з плавною зміною висоти.

Рисунок 4.4 представляє типову місію моніторингу - обліт території за схемою «змійка». Таку траєкторію застосовують для рівномірного покриття площі, збирання просторово щільних точок вимірювання, картографування великих ділянок.

На ньому добре видно: регулярні зміни курсу по осі Y , плавні зміни висоти для імітації польоту над нерівностями рельєфу, стабільний рух уперед по осі X .

3D Zig-Zag UAV Flight Path (Field Monitoring Mission)

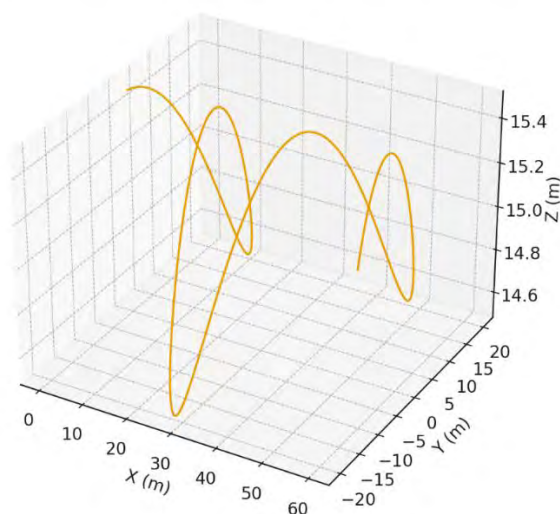


Рисунок 4.4 - Просторова траєкторія обльоту території БПЛА за схемою “змійка” під час виконання місії екологічного моніторингу.

На рисунку 4.5 показано проліт БПЛА через визначені точки маршруту. Вони позначені червоними хрестами, а між ними проходить пряма лінія руху апарата. Траєкторія демонструє: роботу алгоритму навігації за контрольними точками, зміну курсу в різкі моменти переходу від однієї точки до іншої, стабілізацію висоти під час маневрування.

3D UAV Flight Path Through Waypoints

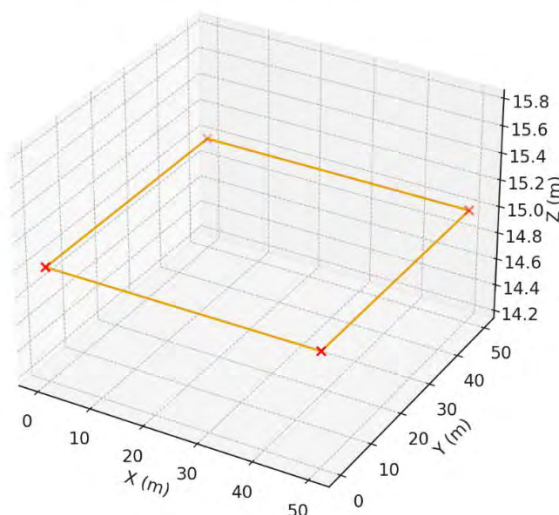


Рисунок 4.5 - Траєкторія руху БПЛА через контрольні точки (waypoints) з різкими змінами напрямку при виконанні місії моніторингу території.

Рисунок 4.6 демонструє роботу моделі при складному польотному сценарії - апарат виконує підйоми, спуски, різкі розвороти, рух по криволінійній траєкторії. Така модель потрібна для тестування алгоритмів стабілізації, аналізу поведінки БПЛА у випадку вітрового навантаження, перевірки чутливості до різкого маневрування.

Complex 3D UAV Trajectory (Climb, Descent, Turns)

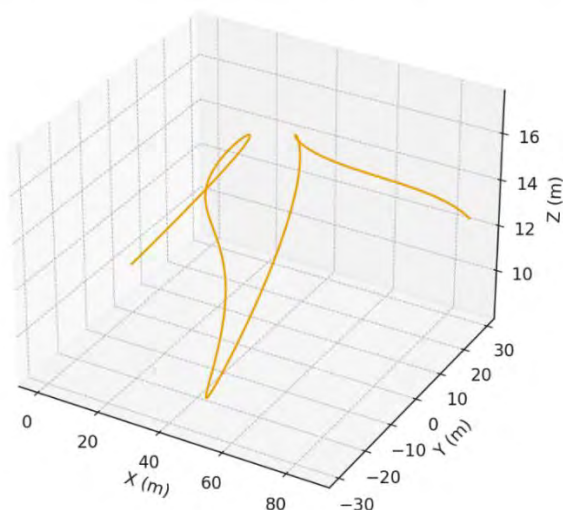


Рисунок 4.6. Складна просторова траєкторія руху БПЛА з підйомами, спусками та розворотами, що моделює реальну місію моніторингу в умовах змінного рельєфу та зовнішніх збурень.

Рисунок 4.7 є особливо важливим для розділу, оскільки він демонструє реальний вплив зовнішніх збурень на траєкторію. Помітно, що: траєкторія при наявності вітру зміщена по осі Y, амплітуда вертикальних коливань також змінюється, БПЛА поступово "зносить", що відповідає моделюванню поперечної складової вітру.

Comparison of UAV Trajectories: No Wind vs Side Wind

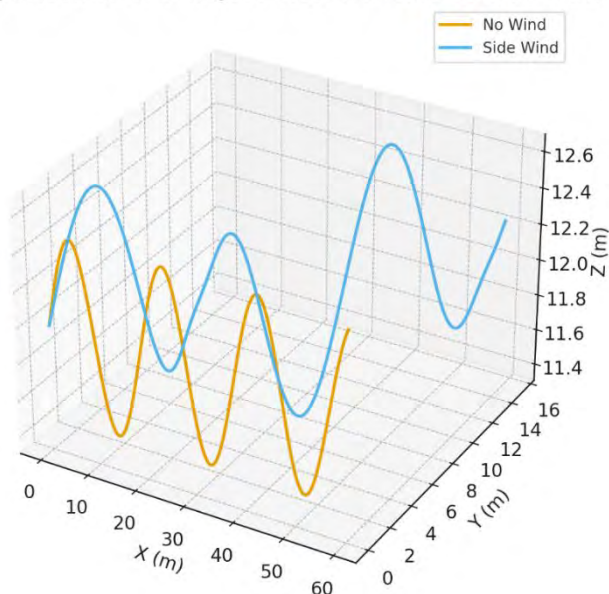


Рисунок 4.7 - Порівняння просторових траєкторій БПЛА під час польоту без вітру та з боковим вітром, що демонструє вплив зовнішніх збурень на точність руху апарата.

4.3. Моделювання збору даних із сенсорів (похибки, завади, дискретність, затримки)

Під час роботи БПЛА сенсори формують дані, які лише частково відображають реальний стан довкілля. На вимірювання впливають як внутрішні фактори роботи сенсора (шум електроніки, обмежена динамічна відповідь, калібрувальні похибки), так і зовнішні (вібрації, потоки повітря, зміни температури, електромагнітні завади). Тому перед початком обробки та передачі даних необхідно змоделювати всі ключові недоліки, характерні для реальних сенсорів. Це дозволяє перевірити алгоритми фільтрації та стійкість усієї системи моніторингу.

1. Моделювання випадкової похибки

Для абсолютно точного вимірювання параметрів необхідно врахувати, що виміряне значення складається з істинного сигналу та випадкової шумової складової.

$$S_{meas}(t) = S_{true}(t) + n(t), \quad (4.14)$$

де

- $S_{meas}(t)$ – виміряне значення сенсора;
- $S_{true}(t)$ – істинне значення параметра;

- $n(t)$ – випадковий шум з нормальним розподілом.

На рис. 4.8 наведено порівняння істинного сигналу та виміряного значення, яке містить випадкову похибку. Істинний сигнал має плавну синусоїдальну форму, тоді як виміряний сигнал коливається навколо нього через додавання гаусівського шуму. Таке відхилення є типовим для реальних сенсорів і демонструє необхідність подальшої фільтрації даних для отримання більш точних вимірювань.

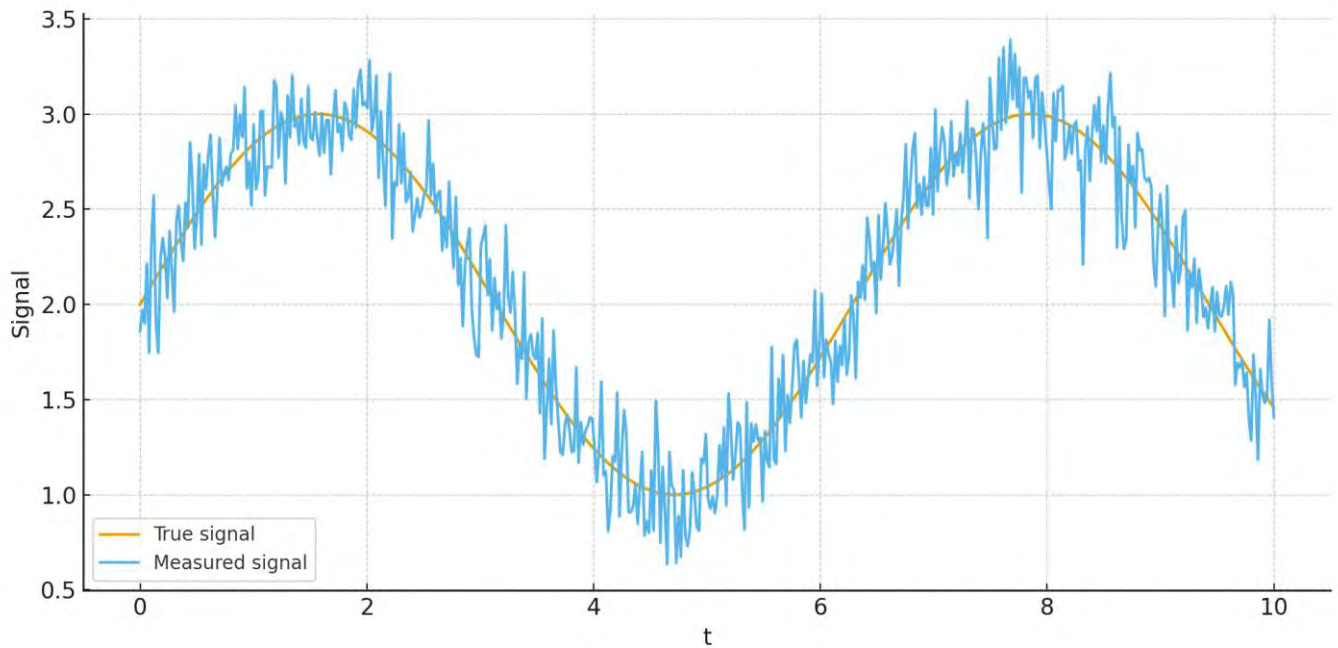


Рисунок 4.8 - Графік істинного сигналу та виміряного значення з урахуванням випадкової похибки, згенерований у середовищі MATLAB

2. Моделювання систематичної похибки(зсуву)

Сенсор може видавати значення, які відрізняються від дійсних через старіння елементів, або калібрувальні помилки. Це проявляється у вигляді систематичного зсуву:

$$S_{meas}(t) = S_{true}(t) + A_v \sin(\omega t) + n(t), \quad (4.15)$$

де

- A_v – амплітуда вібрацій;
- ω – частота вібрацій.

На рис. 4.9 показано порівняння істинного сигналу та виміряного сенсором значення, яке містить систематичну похибку у вигляді періодичного зсуву та

випадковий шум. Видно, що виміряний сигнал коливається навколо істинного, повторюючи його форму, але має додаткову синусоїдальну складову та нерівномірні флуктуації. Це відображає реальну поведінку сенсорів під час вібрацій і неточностей.

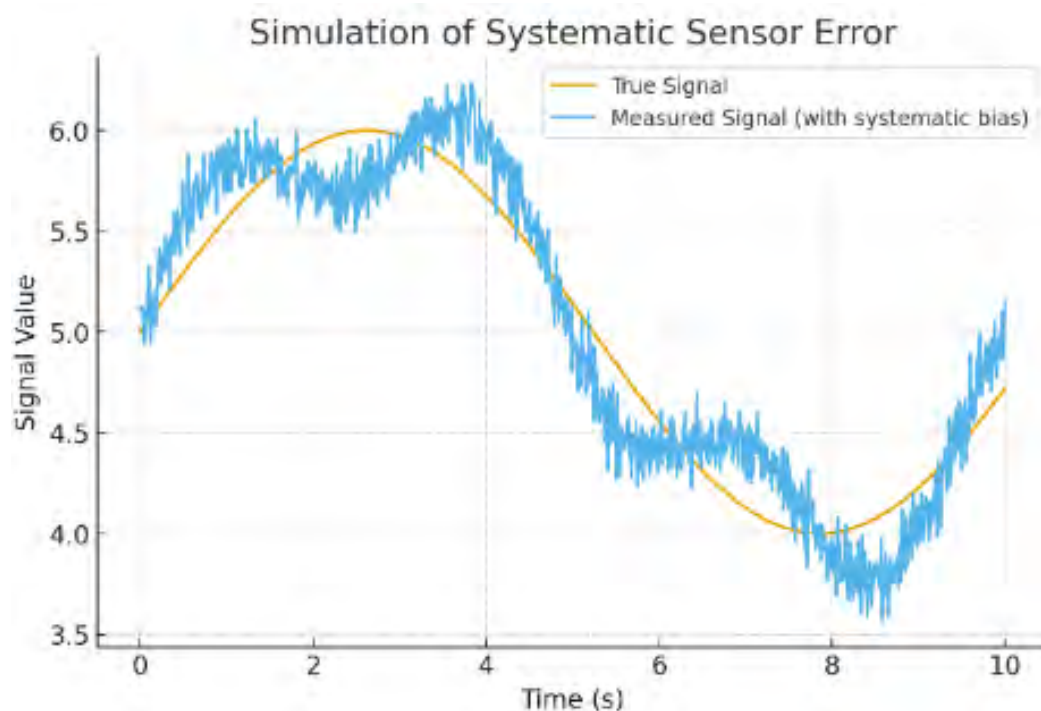


Рисунок 4.9 - Графік моделювання систематичної похибки сенсора, що демонструє вплив періодичного зсуву та випадкового шуму на виміряний сигнал.

3. Дискретність вимірювань

Сенсори працюють із певною частотою оновлення, тому вимірювання приходять через рівні інтервали часу. Це описується як:

$$S_d(k) = S_{true}(kT_s), \quad (4.16)$$

- T_s - період дискретизації;
- k - номер вибірки.

На рис. 4.10 показано порівняння безперервного істинного сигналу та дискретних вимірювань, отриманих з урахуванням періоду дискретизації сенсора. Видно, що значення фіксуються лише у визначені моменти часу, що відповідає частоті оновлення сенсорів. Такий підхід дозволяє врахувати реальну поведінку датчиків, які не можуть реєструвати сигнал неперервно, а передають дані з певною періодичністю.

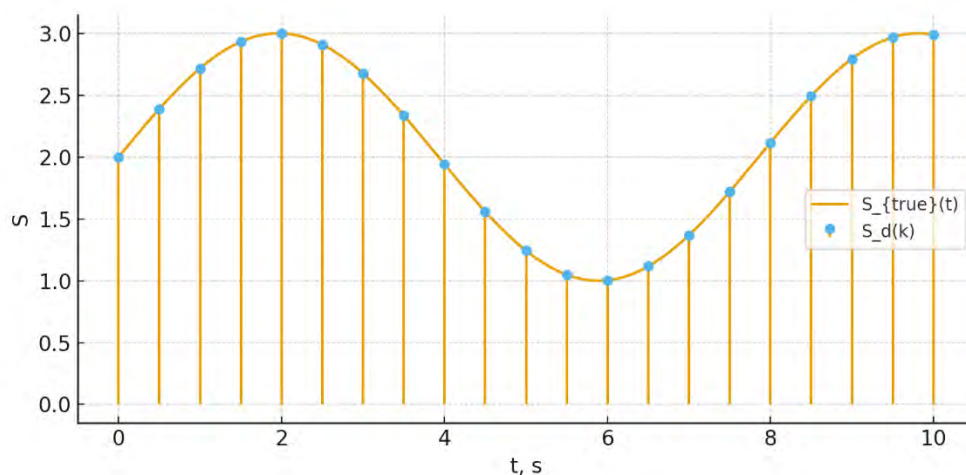


Рисунок 4.10 – Моделювання дискретності вимірювань

4. Моделювання часових затримок

Кожен сенсор має затримку між реальним вимірюванням та передачею даних. Крім того, канал передавання також вносить додаткове запізнення. У моделі затримка представлена:

$$S_{delay}(t) = S_{true}(t - \tau), \quad (4.17)$$

τ - стала або змінна затримка.

На рис. 4.11 показано істинний сигнал(жовта лінія) та сигнал із затримкою(синя лінія). Помітно, що виміряне значення зміщене у часі на величину τ , що імітує інерційність сенсора та затримки в каналі передачі. Завдяки цьому можна оцінити, як часові затримки впливають на подальшу обробку та синхронізацію даних.

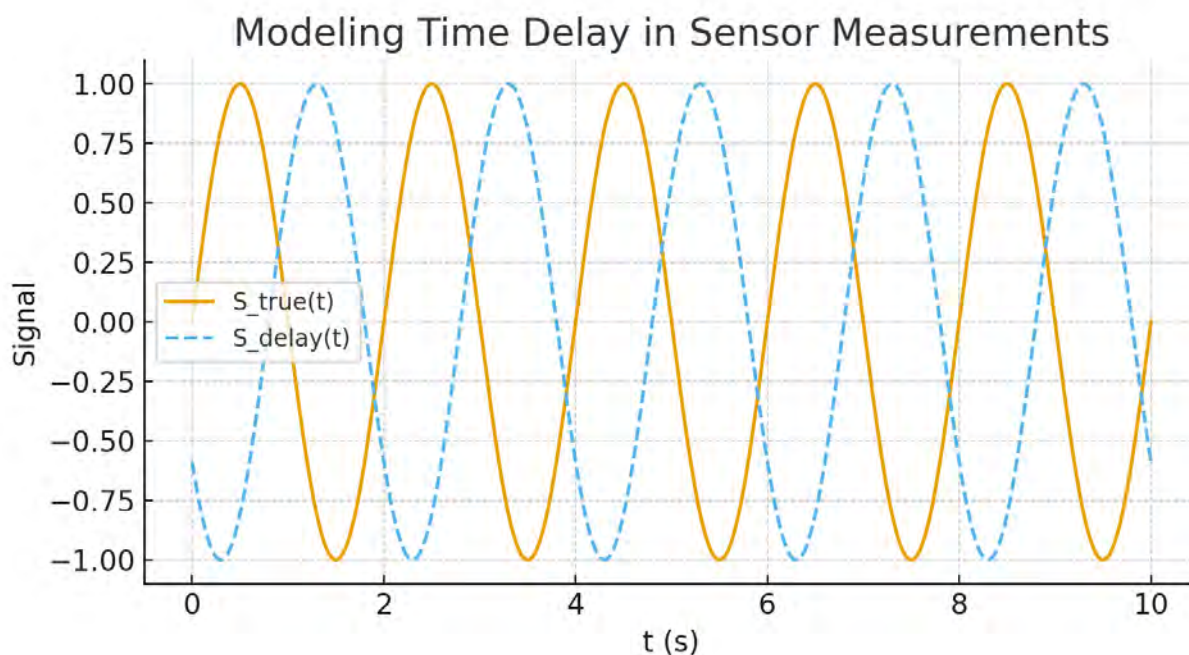


Рисунок 4.11 - Моделювання часової затримки сенсорного сигналу

5. Інерційність сенсорів

Сенсор "не встигає" миттєво реагувати на зміни, і ця інерційність має бути змодельована. Багато екологічних сенсорів мають повільну динаміку (наприклад, CO₂ МН-Z19В). Їхня реакція описується рівнянням першого порядку:

$$\tau \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = S_{true}(t), \quad (4.18)$$

На графіку показано порівняння істинного сигналу та сигналу сенсора, що моделюється рівнянням першого порядку. Видно, що вимірюваний сигнал «запізнюється» та згладжується відносно реального через інерційність, характерну для екологічних сенсорів CO₂, PM2.5 та температури.

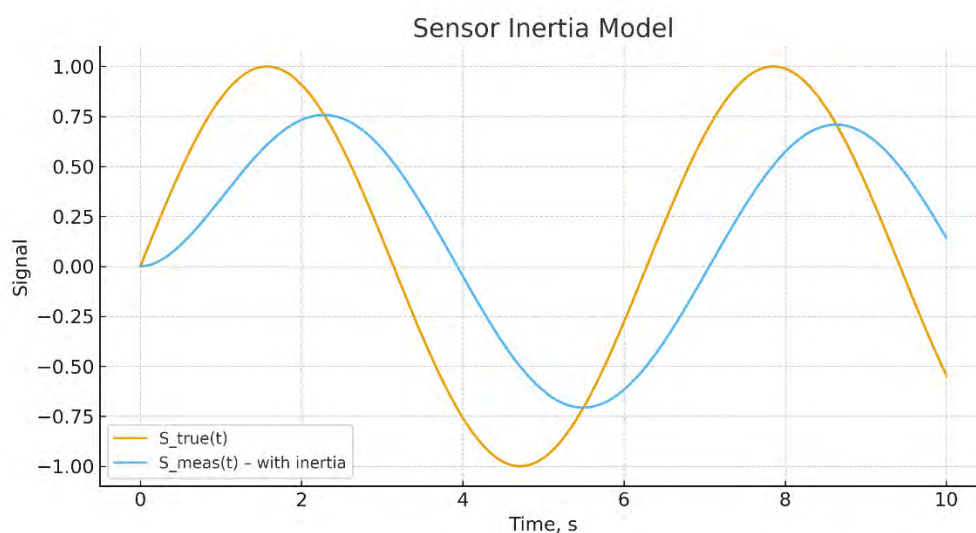


Рисунок 4.12 - Графік моделювання інерційності сенсора

6. Пропуски даних

Пропуски виникають переважно через втрату радіопакетів. У моделі використовують стохастичний підхід:

$$drop(k) = rand() < p, \quad (4.19)$$

p - ймовірність втрати.

7. Підсумкова комплексна модель

Після поєднання всіх ефектів отримаємо:

$$S_{meas}(t) = S_{true}(t - \tau) + A_v \sin(\omega t) + n(t), \quad (4.20)$$

а після дискретизації:

$$S_d(k) = S_{meas}(kT_s), \quad (4.21)$$

Моделювання роботи сенсорів з урахуванням шумів, вібрацій, інерційності, дискретності та пропусків дозволяє отримати реалістичну картину того, як система буде працювати в реальних умовах. Завдяки такій моделі можна правильно оцінити ефективність алгоритмів обробки даних та забезпечити надійну роботу системи в умовах нестабільного зв'язку та постійних зовнішніх впливів. Це робить результати моделювання значно ближчими до практичних сценаріїв використання БПЛА для екологічного моніторингу.

4.5. Імітація процесу передачі даних між БПЛА та наземною станцією

Від надійності та якості каналу зв'язку залежить те, наскільки оперативно та точно оператор отримуватиме інформацію про стан довкілля. Тому при моделюванні системи важливо відтворити процес передачі даних з урахуванням реальних умов роботи БПЛА: шумів каналу, втрат пакетів, обмеженої пропускної здатності та затримок.

Загальна схема передачі даних

Передавання інформації між БПЛА та наземною станцією можна умовно поділити на такі етапи:

1. Формування пакета даних на борту БПЛА.
2. Кодування та передавання сигналу модулятором.
3. Проходження сигналу через радіоканал, який вносить завади.
4. Приймання, декодування та перевірка цілісності даних на наземній станції.
5. Реконструкція та синхронізація даних після втрат та затримок.

1. Формування пакета даних

Перед передаванням даних важливо додати службову інформацію, щоб наземна станція могла правильно розпізнати пакет та переконатися, що вміст не пошкодився під час передачі.

$$P = \{H, T_s, D, CRC\}, \quad (4.22)$$

де

- H – заголовок пакета: ID дрона, тип даних;
- T_s – timestamp, час формування вимірювання;
- D – корисні дані сенсорів (CO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, температура, вологість);
- CRC – контрольна сума для перевірки цілісності пакета.

2. Моделювання радіоканалу зв'язку

Справжній радіоканал ніколи не передає сигнал ідеально, тому що шум накладається на сам сигнал.

$$S_{rx}(t) = S_{tx}(t) + \omega(t), \quad (4.23)$$

де

- $S_{rx}(t)$ - переданий сигнал,
- $S_{tx}(t)$ - прийнятий сигнал,
- $\omega(t)$ - шум, що моделюється як білий гаусівський процес.

3. Моделювання втрати пакетів

У реальному каналі частина пакетів може взагалі не доходити до приймача. Це моделюється через випадкову величину, що дозволяє перевірити, як система поводить себе при різних рівнях пропусків даних:

$$P_{loss} = rand() < p, \quad (4.24)$$

де p - ймовірність втрати (якщо нерівність виконується, пакет втрачається).

4. Моделювання затримок

У польових умовах затримки каналу можуть змінюватися через перешкоди або віддалення БПЛА. Це важливо врахувати для синхронізації часових рядів. Затримка передачі сигналу описується:

$$S_{rx}(t) = S_{tx}(t - \tau), \quad (4.25)$$

де τ може бути сталою або випадковою.

5. Приймання та декодування пакета

Наземна станція виконує: декодування сигналу, перевірку CRC, відкидання пошкоджених пакетів.

Якщо CRC не співпадає, дані вважаються недійсними. CRC перевіряється функцією:

$$CRC = f(P), \quad (4.26)$$

де $f(P)$ - алгоритм хешування або контрольної суми.

6. Реконструкція даних після передачі

Інтерполяція дозволяє отримати рівномірний часовий ряд, який підходить для побудови графіків та карт. Через затримки та втрати пакети приходять нерівномірно. Тому дані потрібно відновити:

$$D_{rec}(t) = interp(D, t), \quad (4.27)$$

Імітація процесу передачі даних дозволила відтворити всі ключові явища, характерні для реального зв'язку між БПЛА та наземною станцією: шум, затримки, втрати пакетів та обмеження пропускної здатності. Модель показала, що використання структурованих пакетів, CRC-контролю та подальшої інтерполяції забезпечує високу надійність передачі даних навіть за наявності завад. Проведене моделювання дозволяє оцінити якість каналу зв'язку та сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів для реальних польотів БПЛА.

4.6. Алгоритми обробки та візуалізації результатів (фільтрація, інтерполяція, відображення на карті)

Після отримання даних від сенсорів БПЛА та їх передачі на наземну станцію необхідно виконати комплексну обробку, оскільки «сирі» вимірювання зазвичай містять шум, провали сигналу, виброси, структуру нерівномірної дискретизації та похибки, зумовлені затримками каналу зв'язку.

1. Фільтрація вимірювань сенсорів

1.1. Необхідність фільтрації

Дані від використовуваних сенсорів містять випадковий шум, імпульсні виброси (через вібрацію, турбулентність, електричні завади), повільний «дрейф» сигналу, нерівномірну зміну при різких маневрах БПЛА.

Тому першим кроком є застосування фільтрації, яка дозволяє відокремити реальні зміни екологічних параметрів від шумових складових.

1.2. Медіанний фільтр

Для видалення гострих піків використовується медіанний фільтр. Він прибирає одиничні виброси та різкі сплески, не розмиваючи форму сигналу.

$$y(k) = \text{median}\{x(k - m), \dots, x(k), \dots, x(k + m)\}, \quad (4.28)$$

де $x(k)$ - виміряне значення,

1.3. Фільтр ковзного середнього

Для згладжування сигналу застосовується ковзне середнє. Цей метод робить сигнал більш плавним та дозволяє зменшити випадкові коливання.

$$y(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(k - i), \quad (4.29)$$

1.4. Низькочастотний фільтр (Low-pass)

Даний фільтр використовується для зменшення вібраційних завад та стабілізації сигналу:

$$y(t) = y(t - \Delta t) + \alpha(x(t) - y(t - \Delta t)), \quad (4.30)$$

2. Інтерполяція та відновлення пропусків у даних[19]

БПЛА працює у динамічному середовищі, тому пропуски даних виникають через втрати пакетів, непостійний час відгуку сенсорів або затримки в каналі зв'язку.

2.1. Лінійна інтерполяція

Лінійна інтерполяція просто проводить пряму між двома вимірюваннями та визначає значення на проміжку. Вона найпростіша і добре працює, коли пропуски невеликі.

$$D_{rec}(t) = D(t_i) + \frac{D(t_{i+1}) - D(t_i)}{t_{i+1} - t_i} (t - t_i), \quad (4.31)$$

де

- $D(t_i)$ - значення сенсора у відомій точці часу;
- $D(t_{i+1})$ - наступне коректне значення;
- $(t - t_i)$ - наскільки поточний момент віддалений від першої точки; дробова частина.

2.2. Spline-інтерполяція[18]

Сплайн - це гладка крива, яка проходить через усі відомі точки і водночас мінімізує «різкі злами». Сплайн-інтерполяція дає більш «правдоподібну» форму сигналу та підходить для екологічних даних, де параметри змінюються поступово.

$$D_{rec}(t) = S(t), \quad (4.32)$$

де $S(t)$ - кубічний сплайн, побудований за набором точок.

2.3. Інтерполяція найближчого сусіда

Значення у відсутній точці просто копіюється від найближчого вимірювання.

$$D_{rec}(t) = D(t_i), \text{ де } t_i = \operatorname{argmin}|t - t_i|, \quad (4.33)$$

3. Відображення екологічних даних на карті

Після відновлення та фільтрації дані можна використати для просторової візуалізації. Це дозволяє побачити рівні забруднення на маршруті БПЛА або оцінити географічні відмінності.

3.1. Метод IDW (Inverse Distance Weighting)

Коротке пояснення: чим ближче точка - тим більше вона впливає на результат.

$$Z(p) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^k}}, \quad (4.34)$$

де

- Z_i - виміряне значення в точці i ;
- d_i - відстань від точки iii до точки, де виконується оцінка;
- k - параметр впливу (зазвичай 1–3).

3.2. Метод Kriging[20]

Kriging точніший, але складніший. Його часто застосовують у геології та екології для побудови реалістичних карт концентрацій.

$$Z(p) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i, \quad (4.35)$$

де коефіцієнти λ_i підбираються так, щоб мінімізувати дисперсію похибки.

3.3. Побудова маршруту БПЛА

Щоб відобразити траєкторію польоту на карті, GPS-координати перетворюються у локальну метричну систему:

$$x = R \cos(lat_0)(lon - lon_0), \quad (4.36)$$

$$y = R(lat - lat_0), \quad (4.37)$$

Застосування алгоритмів фільтрації, інтерполяції та просторового відображення дозволяє суттєво підвищити якість екологічних даних, зібраних БПЛА. Очищені сигнали краще відображають реальний стан довкілля, а візуалізація на карті забезпечує наочне представлення просторових змін параметрів. Завдяки цьому система моніторингу здатна працювати надійно навіть за умов шумів та нестабільного каналу зв'язку, а отриманий результат стає інформативним та придатним для подальшого аналізу.

4.7. Аналіз результатів моделювання та їх використання для вдосконалення системи

Після побудови математичної моделі руху БПЛА, моделювання роботи сенсорів, каналу передачі даних та алгоритмів обробки було проведено аналіз отриманих результатів. Основна мета цього аналізу - оцінити, наскільки розроблена автоматизована система збору та аналізу даних здатна працювати в умовах, наближених до реальних, а також визначити напрямки її подальшого вдосконалення.

У ході моделювання досліджувались такі аспекти роботи системи:

- точність проходження траєкторії БПЛА за різних сценаріїв польоту;
- стійкість сенсорних вимірювань до шумів, вібрацій та пропусків;
- вплив параметрів радіоканалу (шум, втрати пакетів, затримки) на цілісність даних;
- ефективність алгоритмів фільтрації, інтерполяції та просторової візуалізації.

1. Аналіз траєкторій руху БПЛА

Моделювання різних сценаріїв польоту (прямолінійна траєкторія з коливаннями висоти, схема «змійка», рух через контрольні точки, складна 3D-траєкторія, політ з вітром і без нього) показало, що обрана математична модель є достатньо інформативною для задач екологічного моніторингу.

Основні спостереження:

- при прямолінійному польоті з плавною зміною висоти БПЛА зберігає стабільний напрямок, а коливання висоти добре відстежуються моделлю;

- траєкторія типу «змійка» дозволяє рівномірно покривати територію, що є корисним для побудови детальних карт забруднення;
- при русі через контрольні точки видно різкі зміни курсу, але при правильному виборі коефіцієнта регулятора по курсу відхилення від заданого маршруту залишаються в допустимих межах;
- моделювання бокового вітру показало, що, за відсутності додаткової компенсації, траєкторія поступово зміщується, що може призводити до «зсуву» карти вимірювань відносно планованої зони.

Ці результати підтверджують, що вплив вітру та маневрів обов'язково потрібно враховувати при плануванні місії, а в подальшому - доповнити систему алгоритмами компенсації збурень.

2. Аналіз якості сенсорних вимірювань

Моделювання збору даних із сенсорів із урахуванням шуму, вібрацій, інерційності та пропусків показало, що «ідеальні» дані в реальності недосяжні, і саме обробка відіграє ключову роль.

Було встановлено, що:

- додавання гаусівського шуму та вібраційної складової призводить до помітного «розкиду» показників, особливо для PM2.5;
- моделювання інерційності сенсора CO₂ показало, що швидкі зміни концентрації відображаються із затримкою, що потрібно враховувати при інтерпретації результатів;
- при випадкових пропусках вимірювань (через втрату пакетів) часові ряди стають «дірчастими» і потребують подальшого відновлення.

Застосування медіанного фільтра, фільтра ковзного середнього та простого low-pass фільтра показало свою ефективність:

- медіанний фільтр добре прибирає одиничні імпульсні сплески, зберігаючи форму сигналу;
- ковзне середнє та низькочастотна фільтрація зменшують рівень випадкового шуму та роблять графіки придатними для подальшого аналізу й картографування.

3. Аналіз впливу параметрів каналу передачі даних

Імітація радіоканалу із шумом, втратами пакетів та часовими затримками показала, що саме канал зв'язку може суттєво впливати на повноту та синхронність даних.

Основні висновки:

- додавання білого гаусівського шуму до передаваного сигналу призводить до появи помилкових пакетів, які успішно відбраковуються при перевірці CRC;
- при збільшенні ймовірності втрати пакетів p над певний поріг (10–20%) часові ряди стають фрагментованими, і система сильніше залежить від інтерполяційних методів;
- введення затримок та джитера (змінної затримки) призводить до нерівномірного надходження даних, що негативно впливає на побудову послідовних графіків без попередньої синхронізації.

Разом із тим моделювання показало, що:

- використання структурованих пакетів із заголовком, часовою міткою та контрольної сумою дозволяє чітко відслідковувати порядок надходження даних та відкидати пошкоджену інформацію;
- застосування інтерполяції після передачі дозволяє відновити цілісні часові ряди навіть за умови помірного рівня втрат.

4. Ефективність алгоритмів обробки та візуалізації

Результати обробки показали, що поєднання фільтрації, інтерполяції та просторового згладжування дає змогу перетворити «сирі» та зашумлені дані на інформативні карти.

Зокрема було встановлено, що:

- лінійна інтерполяція добре працює для коротких пропусків між сусідніми вимірюваннями;
- сплайн-інтерполяція формує гладкі криві й особливо корисна при побудові теплових карт та полів концентрації;
- метод IDW дає наочні теплові карти при відносно невеликій кількості точок;

- метод Kriging забезпечує більш точне відтворення просторового розподілу, але є обчислювально складнішим.

Візуалізація траєкторії БПЛА разом із полем концентрацій CO₂ або PM_{2.5} дозволяє наочно оцінити, як змінюються параметри довкілля уздовж маршруту польоту.

5. Виявлені обмеження та шляхи вдосконалення системи

Аналіз результатів моделювання дозволив виявити кілька слабких місць системи, які варто врахувати під час подальшого розвитку:

- **чутливість до вітру:** при боковому вітрі траєкторія помітно зноситься, що може призводити до неповного покриття досліджуваної зони;
- **вплив вібрацій:** сенсори, розташовані близько до силових елементів, сильніше піддаються вібраційним завадам;
- **затримки та втрати в каналі зв'язку:** при високому рівні втрат даних зростає роль інтерполяції, що знижує точність миттєвих значень;
- **інерційність частини сенсорів:** повільна реакція деяких датчиків ускладнює аналіз швидкоплинних змін.

На основі цього сформовано такі рекомендації:

- удосконалити алгоритми керування БПЛА з урахуванням компенсації вітру;
- оптимізувати розміщення сенсорів на корпусі та передбачити демпферні кріплення для зменшення вібрацій;
- використовувати більш стійкі схеми кодування й, за можливості, корекцію помилок (FEC) у каналі зв'язку;
- підбирати параметри фільтрації та інтерполяції з урахуванням конкретних характеристик сенсорів і сценаріїв моніторингу.

6. Загальний висновок за результатами моделювання

Узагальнюючи, результати моделювання показали, що розроблена автоматизована система збору та аналізу даних на базі БПЛА є працездатною та потенційно придатною для практичного застосування в екологічному моніторингу. Модель дозволила:

- відтворити повний цикл роботи - від руху БПЛА до візуалізації екологічних параметрів на карті;
- оцінити вплив шумів, завад, втрат пакетів і затримок на якість інформації;
- перевірити ефективність обраних алгоритмів фільтрації та інтерполяції;
- сформулювати рекомендації щодо покращення як апаратної, так і програмної частини системи.

Таким чином, проведений аналіз не лише підтвердив правильність обраних технічних рішень, але й став основою для подальшого вдосконалення системи моніторингу на етапі її практичної реалізації.

Розділ 5. Розробка стартап проєктів «Автоматизована система збору та аналізу даних про параметри довкілля з використанням безпілотного літального апарата»

5.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту

Сучасна екологічна ситуація потребує оперативного та точного моніторингу стану довкілля, однак стаціонарні станції є дорогими й не забезпечують достатнього охоплення.

Тому запропоновано створити мобільну автоматизовану систему моніторингу на базі БПЛА, здатну працювати у важкодоступних зонах, збирати дані та автоматично їх обробляти й візуалізувати.

Головна ідея стартапу (табл. 5.1) - розробити доступний і гнучкий інструмент екологічного моніторингу, ефективний у тих умовах, де традиційні системи є нерентабельними або малоефективними.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення автоматизованої системи збору та аналізу даних про стан довкілля на основі БПЛА, оснащеного сенсорами CO ₂ , PM2.5, температури, вологості, тиску та GPS/IMU, із передачею даних у режимі реального часу та формуванням аналітичних карт, графіків і звітів.	1. Моніторинг якості повітря в містах	• Оперативне виявлення зон забруднення • Висока точність вимірювань • Можливість моніторингу на різних висотах • Створення карт поширення забруднень
	2. Контроль екологічного стану промислових зон	• Виявлення аварійних викидів • Зниження ризиків для персоналу • Доступ до важкодоступних ділянок
	3. Моніторинг лісових масивів і природних територій	• Рання діагностика пожежних ризиків • Визначення впливу людської діяльності • Виявлення локальних джерел забруднення
	4. Аграрний моніторинг (стан ґрунтів і рослинності)	• Аналіз якості повітря та мікроклімату в полі • Прогнозування стану врожаю
	5. Оперативні дослідження у надзвичайних ситуаціях	• Моніторинг зон техногенних аварій • Можливість роботи у небезпечних умовах

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
		•Експрес-аналіз стану атмосфери
	6. Наукові дослідження	•Збір точних даних у будь-якій локації •Стандартизоване вимірювання параметрів •Зниження вартості польових досліджень

Аналіз техніко-економічних переваг ідеї порівняно з конкурентами

Для порівняння(табл. 5.2) обрані три основні групи:

- Конкурент 1 - стаціонарні станції моніторингу (Lufft, Aeroqual): висока точність, дуже висока ціна, нульова мобільність.
- Конкурент 2 - портативні сенсори (Temtop, Atmotube): дешеві, мобільні, але малоточні та не дають даних на висоті.
- Конкурент 3 - професійні рішення на БПЛА (DJI + Sniffer4D): висока якість, але дуже висока вартість (20–40 тис. \$).

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Характеристика	Мій проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3	W	N	S
1	Мобільність	Висока	Низька	Висока	Середня			+
2	Вартість	Середня/низька	Дуже висока	Низька	Дуже висока	+		
3	Точність	Висока	Дуже висока	Середня	Висока		+	
4	Моніторинг на висоті	Так	Ні	Ні	Так			+
5	Робота в небезпечних зонах	Так	Ні	Ні	Так			+
6	Дальність/автономність	Середня	Середня	Низька	Середня		+	
7	Аналітична система	Розширена	Розширена	Обмежена	Розширена		+	
8	Енергоспоживання	Низьке	Середнє	Низьке	Високе		+	
9	Простота експлуатації	Висока	Низька	Висока	Середня			+
10	Вартість обслуговування	Низька	Висока	Низька	Дуже висока	+		

Можна зробити висновок, що ідея стартап-проєкту має високий ринковий потенціал завдяки поєднанню мобільності, мультисенсорного збору даних, можливості роботи на висоті, потужних аналітичних інструментів і відносно низької собівартості. Система може зайняти проміжну позицію між дорогими професійними комплексами та дешевими портативними сенсорами, при цьому пропонуючи унікальне поєднання функцій і конкурентних переваг.

Технологічний аудит проєкту

Успіх стартапу залежить від реальної можливості впровадження обраної технології. Технологічна здійсненність (табл. 5.3) охоплює оцінку технічних ресурсів, доступних компонентів та програмних рішень, а також визначення елементів, які можна виконати самостійно.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій автора
1	Створення мобільної платформи на БПЛА	Виробництво апаратної частини БПЛА (модульні квадрокоптери, платформи PX4/ArduPilot)	Наявні на ринку	Доступні (open-source, комерційні комплекти)
2	Інтеграція сенсорного комплексу	Підключення та калібрування сенсорів CO ₂ , PM2.5, t°, RH, тиску (UART, I ² C, SPI інтерфейси)	Існують у готовому вигляді	Доступні авторам, необхідна базова адаптація
3	Обробка та синхронізація даних	Мікрокомп'ютери та мікроконтролери (ESP32, Raspberry Pi, Jetson Nano)	Наявні	Доступні для придбання та розробки
4	Передача даних у реальному часі	Бездротові канали зв'язку (LoRaWAN, Wi-Fi 2.4/5 ГГц, LTE/4G/5G)	Наявні	Доступні; потребують мінімальної конфігурації
5	Обчислення та аналітика	серверна та хмарна аналітика + машинне навчання (Python, TensorFlow, FastAPI, Grafana)	Існують, широко застосовуються	Повністю доступні авторам
6	Візуалізація результатів	GIS-системи та інтерактивні dashboards (QGIS, ArcGIS, Plotly, Power BI)	Наявні на ринку	Частково доступні (open-source + освітні ліцензії)
7	Розробка інтерфейсу оператора	Створення UI/UX для моніторингу в реальному часі (React, PyQt5, Dash)	Наявні	Доступні авторам

№	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій автора
8	Збереження даних	Бази даних (PostgreSQL, MongoDB, InfluxDB)	Наявні	Повністю доступні
9	Автономна навігація та політні місії	Автопілоти з відкритим кодом (Pixhawk, ArduPilot, PX4)	Наявні	Доступні авторам
10	Генерація звітів	Автоматичне формування PDF та аналітичних звітів (ReportLab, LaTeX, Python)	Існують	Доступні

На основі наведеної таблиці можна зробити висновок, що технологічна реалізація проєкту є повністю здійсненою. Усі ключові елементи - від апаратної платформи БПЛА та сенсорного комплексу до каналів зв'язку, серверної аналітики, баз даних, GIS-візуалізації та генерації звітів - вже існують на ринку і активно застосовуються в суміжних сферах.

5.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

Ринок екологічного моніторингу з використанням БПЛА розвивається на стику безпілотної авіації, екології, «розумних міст», агросфери та промислового контролю. У світі такі системи вже застосовують для вимірювання якості повітря, виявлення викидів і моніторингу небезпечних зон.

В Україні цей напрям новий, але перспективний через екологічні проблеми, наслідки війни та потребу в доступніших і мобільних альтернативах стаціонарним станціям. Для оцінки потенціалу наведено узагальнену характеристику цільового ринку(табл. 5.4) України та Східної Європи.

Таблиця 5.4. Характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10–15 спеціалізованих компаній (дрони + моніторинг довкілля, геодезія, агродрони, екологічні лабораторії)
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од	Орієнтовно 150–250 млн грн на рік (послуги аерозйомки, екологічного моніторингу, продаж рішень «дрон + аналітика»)

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Помірно зростаюча (зростання попиту на екологічний контроль, дрони, цифрову аналітику)
4	Наявність обмежень для входу (характер обмежень)	Потрібні дозволи на польоти БПЛА, дотримання авіаційних правил, вимоги до метрології вимірювальних приладів, капіталомісткість обладнання
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Вимоги до точності та калібрування сенсорів, екологічні норми, можливе узгодження з держорганами (екологічні служби)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Орієнтовно 15–20 % для інноваційних B2B-сервісів у сфері дрон-послуг та екологічної аналітики

Аналіз показує, що ринок екологічного моніторингу з використанням БПЛА має помірне зростання, відносно невелику кількість ключових гравців і достатній обсяг продажів, що свідчить про наявність попиту. Водночас існують бар'єри входу, пов'язані з регуляцією польотів, вимогами до точності сенсорів та необхідністю дорогого обладнання. Попри це, середня рентабельність на рівні 15–20 % робить ринок привабливим для інноваційних проєктів і створює перспективні умови для виходу стартапу.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

Для визначення ринкових можливостей важливо проаналізувати групи споживачів, які можуть потребувати мобільної системи екологічного моніторингу на базі БПЛА. Кожен сегмент має власні мотиви, умови роботи, вимоги до точності, мобільності та рівня сервісу. Таблиця 5.4 узагальнює ключові цільові групи, їхню поведінку та очікування щодо продукту.

Таблиця 5.4. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№	Потреба, що формує ринок (базова потреба)	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці потенційних груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Вимоги споживачів до товару	Промислові підприємства (ТЕЦ, металургія, цементні заводи, хімічні підприємства)	Орієнтовані на дотримання норм, перевірки контролюючих органів, мінімізацію штрафів; рішення приймають	До продукції: висока точність вимірювань, надійність БПЛА, можливість регулярних маршрутів, зручна звітність для інспекцій.

№	Потреба, що формує ринок (базова потреба)	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці потенційних груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
			керівники Екологічних та Охорони праці служб	До постачальника: конфіденційність даних, техпідтримка, можливість сервісного обслуговування.
2	Моніторинг стану довкілля на рівні міста/регіону	Місцеві органи влади, департаменти екології, служби «розумного міста»	Орієнтація на публічну звітність, відкриті дані, участь у грантових/екологічних програмах; закупівлі за процедурами тендерів	До продукції: інтеграція з GIS, карти забруднень, історія вимірювань, зрозуміла візуалізація для звітів. До постачальника: прозорість, дотримання держстандартів, досвід впроваджень, навчання персоналу.
3	Моніторинг якості повітря та пилових викидів на будівництвах, полігонах, кар'єрах	Будівельні компанії, кар'єри, логістичні хаби, великі інфраструктурні проекти	Більш гнучкі у прийнятті рішень, орієнтовані на зменшення ризиків та конфліктів з місцевими жителями/екологічними службами	До продукції: мобільність, можливість оперативного виїзду/обльоту, порівняно невисока ціна послуги. До постачальника: швидкість реагування, гнучкі умови контрактів, можливість працювати «під ключ».
4	Наукові дослідження та навчальні задачі з екології, клімату, урбаністики	Університети, науково-дослідні інститути, екологічні громадські організації	Часто працюють з грантовими коштами, зацікавлені у відкритих форматах даних, документуванні методик та можливості модифікувати рішення під власні задачі	До продукції: відкриті формати експорту (CSV, GeoJSON), можливість кастомізації маршрутів і сенсорів. До постачальника: наукова співпраця, методичні матеріали, доступна ціна/академічні знижки.
5	Оперативний моніторинг зон надзвичайних ситуацій (пожежі, хімічні аварії, воєнні пошкодження інфраструктури)	Служби ДСНС, військові/цивільні штаби реагування, екологічні інспекції при НС	Працюють в умовах часу-критичних рішень, висока цінність швидкості і безпеки, менш чутливі до вартості одиначної операції	До продукції: стійкість БПЛА до складних умов, швидке розгортання, автономні місії. До постачальника: надійність, можливість оперативної підтримки, навчання операторів, конфіденційність/безпека даних.

Узагальнюючи, можна виділити кілька важливих моментів:

Усі сегменти мають спільну базову потребу - доступ до якісних екологічних даних, але різні акценти: промисловість на нормативи та штрафи, міста на публічну аналітику, наука на гнучкість і відкритість, ДСНС на швидкість і безпеку.

Для стартапу це означає, що продукт має бути модульним: базове ядро (БПЛА + сенсори + аналітика) та додаткові пакети - «промисловий», «муніципальний», «науковий», «надзвичайні ситуації».

5.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту

На основі загального аналізу середовища можна виділити низку ринкових можливостей(табл. 5.5) та ринкових загроз(табл. 5.6), які впливатимуть на запуск і розвиток стартапу з екологічного моніторингу на базі БПЛА.

Таблиця 5.5. Фактори ринкових можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція стартапу
1	Зростання уваги до екології та «зеленої» політики	Підвищується попит на прозорі дані про стан повітря, вплив промисловості, наслідки війни для довкілля	Позиціонувати систему як інструмент об'єктивного екоконтролю та підготовки звітів для програм відновлення
2	Розвиток ринку дрон-послуг	Дрони вже активно використовуються для аерозйомки, агромоніторингу – легше пояснити цінність «дрон + сенсори»	Пропонувати екологічний моніторинг як логічне доповнення до існуючих дрон-сервісів
3	Поява нових сенсорів та хмарних технологій	Доступні дешевші та точніші датчики, хмарна аналітика, GIS-інструменти	Будувати гнучку архітектуру: легко оновлювати сенсори, алгоритми та модулі аналізу
4	Грантові та державні програми	Екологічні проекти часто підтримуються міжнародними фондами, програмами відновлення інфраструктури	Орієнтувати окремих напрямків на участь у грантових програмах, спільних пілотах з містами та університетами
5	Попит на швидкий мобільний моніторинг	Стаціонарні станції дорогі й малорухомі, тоді як БПЛА	Наголошувати на мобільності та швидкості розгортання платформи порівняно з

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція стартапу
		швидко покриває великі площі	класичними стаціонарними рішеннями

Таблиця 5.6. Фактори ринкових загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція стартапу
1	Посилення регулювання польотів БПЛА	Зміни в законодавстві можуть ускладнити використання дронів над містами, стратегічними об'єктами тощо	Передбачити юридичну підтримку, розробити стандартизовані сценарії польотів, співпрацювати з регуляторами
2	Конкуренція з боку великих дрон-компаній	Великі гравці можуть додати екологічні сенсори до вже існуючих продуктів	Зайняти вузьку нішу «екологічна аналітика + науковий підхід», робити ставку на гнучкість і кастомізацію
3	Обмежені бюджети на екологічні проекти	Частина потенційних клієнтів (муніципалітети, університети) має обмежене фінансування	Запропонувати поетапне впровадження, модель «послуга як сервіс» (оренда БПЛА, вимірювань), гнучку тарифну сітку
4	Технічні ризики (відмова БПЛА, сенсорів)	Аварія дрона або збій сенсорів може призвести до втрати даних, недовіри клієнтів	Передбачити резервні сценарії: дублювання польотів, логування даних на борту, сервісне обслуговування, страхування
5	Недовіра до нових методів вимірювання	Частина замовників звикла до стаціонарних постів і лабораторних вимірювань	Підготувати методичні матеріали, провести пілотні проекти з порівнянням результатів зі стаціонарними станціями

Аналіз ринку показує, що стартап з екологічного моніторингу на базі БПЛА має реальні перспективи виходу на ринок: сегмент помірно зростає, конкуренція обмежена, рентабельність - на прийнятному рівні. Попит формують промислові підприємства, місцева влада, наукові установи та служби реагування.

Аналіз пропозиції: ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Стан конкурентного середовища у сфері екологічного моніторингу та дрон-послуг визначає масштаби можливостей стартап-проекту, рівень ринкового ризику та стратегічні підходи до позиціонування. У таблиці 5.6 наведено систематизований ступеневий аналіз конкуренції.

Таблиця 5.6. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії)
1	Тип конкуренції: монополістична конкуренція	На ринку існує різноманіття компаній, що пропонують послуги дрон-зйомки, екологічного моніторингу, лабораторних вимірювань. Товари та послуги диференційовані (різні підходи, різна точність, різні технології). Вхід на ринок відносно вільний, але потребує апаратних інвестицій.	Робити ставку на унікальність: вимірювання з повітря, комплексність (БПЛА + сенсори + аналітика), точність даних, інноваційність. Розвивати бренд, сервіс, методики, післяпродажне обслуговування.
2	Рівень конкурентної боротьби: національний з елементами локального	Послуги екологічних вимірювань та дрон-зйомки надаються як всеукраїнськими компаніями, так і локальними сервісами у великих містах.	Виходити спочатку на локальні ринки (області, міста), створювати портфель кейсів, співпрацювати з муніципалітетами, а потім масштабуватись на національний рівень.
3	Галузева ознака: міжгалузева конкуренція	Конкурують як компанії дрон-послуг, так і екологічні лабораторії, GIS-фірми, аналітичні компанії.	Показувати переваги мобільності та оперативності БПЛА над стаціонарними постами; пропонувати співпрацю з лабораторіями замість прямої конкуренції.
4	Конкуренція за видами товарів: товарно-родова та товарно-видова	Родова конкуренція – між різними технологіями моніторингу (дрони, стаціонарні пости, мобільні лабораторії). Видова – між різними рішеннями на БПЛА (різні моделі сенсорів, різні інтерфейси, різні підходи до аналітики).	Створити універсальну платформу, яка легко адаптується під різні задачі та сегменти. Пропонувати підвищену точність, інтеграцію з GIS та хмарною аналітикою.
5	Характер конкурентних переваг: переважно нецінова конкуренція	Компанії конкурують не ціною, а точністю вимірювань, інноваційністю, швидкістю реакції, якістю програмного забезпечення, можливістю кастомізації.	Компанії конкурують не ціною, а точністю вимірювань, інноваційністю, швидкістю реакції, якістю програмного забезпечення, можливістю кастомізації.
6	Інтенсивність: немарочна конкуренція з елементами формування бренду	Бренд має значення, але не є вирішальним; важливі технічні характеристики, досвід виконання проєктів та репутація.	Створювати репутацію через кейси, відкриті звіти, наукові публікації, участь у грантах. Розвивати фірмовий стиль та впізнаваність торгової марки.

Ступеневий аналіз конкурентного середовища свідчить, що ринок екологічного моніторингу з використанням БПЛА характеризується монополістичною

конкуренцією, різноманіттям технологій та помірною інтенсивністю боротьби. Успіх на цьому ринку визначається не стільки ціною, скільки інноваційністю, точністю вимірювань, якістю аналітики та швидкістю реагування.

Для стартапу ключовими можливостями є мобільність, комплексність рішення та можливість адаптації під різні сегменти. Правильне позиціонування, формування репутації та акцент на технічних перевагах дозволять ефективно конкурувати з існуючими компаніями й поступово зміцнювати свої ринкові позиції.

Аналіз конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера

Для розуміння конкурентного середовища стартапу доцільно використати модель 5 сил М. Портера, яка оцінює не лише пряму конкуренцію, а й вплив нових гравців, постачальників, клієнтів і товарів-замінників.

У сфері екологічного моніторингу з БПЛА основними учасниками ринку є: компанії дрон-послуг, екологічні лабораторії та стаціонарні пости, постачальники обладнання, органи влади й підприємства як клієнти, а також альтернативні рішення — мобільні лабораторії, стаціонарні станції та супутникові дані.

На цій основі формується таблиця аналізу(табл. 5.7) за моделлю Портера.

Таблиця 5.7. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові	Зміст	Висновки
Прямі конкуренти в галузі	Компанії, що надають послуги аерозйомки та інспекції об'єктів з дронів, окремі фірми, які вже пропонують екологічний моніторинг повітря за допомогою БПЛА, а також традиційні екологічні лабораторії, що поступово впроваджують мобільні рішення.	Інтенсивність конкурентної боротьби серед прямих конкурентів середня: ринок активно розвивається, але спеціалізованих рішень з повноцінною автоматизацією збору та аналізу даних з БПЛА поки небагато.
Потенційні конкуренти	Нові стартапи у сфері «green tech», IT-компанії, що працюють з GIS/IoT, а також виробники БПЛА, які можуть додати екологічні модулі до своїх продуктів. Вхід на ринок полегшується доступністю технологій, але потребує інвестицій та експертизи в екології.	Вхід нових гравців реальний, особливо з боку IT-стартапів та виробників дронів. Потенційні конкуренти можуть з'явитися протягом 1–3 років, тому важливо швидко зайняти нішу та сформувати портфель успішних кейсів.
Постачальники	Постачальники БПЛА (квадрокоптери, автопілоти), сенсорів CO ₂ , PM2.5, t°, RH, тиску, GPS-модулів, а також хмарних	Постачальники частково можуть диктувати умови (ціна, строки поставок), але завдяки наявності альтернативних брендів та open-

Складові	Зміст	Висновки
	сервісів та серверних рішень. Їх сила визначається цінами, стабільністю поставок і доступністю якісних компонентів.	source платформ (PX4, ArduPilot) їх сила помірна. Необхідно працювати з кількома постачальниками та планувати закупівлі завчасно.
Клієнти	Органи місцевого самоврядування, промислові підприємства, аграрні компанії, природоохоронні організації, науково-дослідні установи. Вони зацікавлені у достовірних та оперативних даних, але чутливі до ціни та якості сервісу.	Клієнти мають досить сильні позиції, оскільки можуть обирати між різними підходами (дрони, стаціонарні пости, лабораторії). Вони диктують вимоги до точності, періодичності вимірювань та формату звітності. Важливо пропонувати гнучкі умови, прозорий сервіс і якісну аналітику.
Товари-замінники	Стаціонарні станції моніторингу повітря, мобільні лабораторії, супутникові дані, дані від інших відкритих платформ моніторингу. Вони можуть частково замінити вимірювання з БПЛА, особливо для довготривалих трендів.	Товари-замінники обмежують можливості стартапу на ринку, але повністю не замінюють мобільний моніторинг з БПЛА. Їхня основна перевага – довготривалі ряди даних, основний недолік – низька просторово-часова гнучкість. Стартап має робити акцент на мобільності та деталізації даних.

Аналіз за моделлю Портера показує, що ринок екологічного моніторингу з БПЛА має помірний конкурентний тиск: прямих спеціалізованих рішень поки небагато, але поява нових гравців у найближчі роки цілком реальна. Постачальники мають обмежений вплив завдяки наявності альтернатив, тоді як клієнти - навпаки, сильні та вимогливі, оскільки можуть обирати між різними технологіями.

У цілому, ринок є перспективним, але потребує швидкого позиціонування, формування довіри та акценту на унікальних технологічних перевагах стартапу.

Фактори конкурентоспроможності

Для успішного виходу стартапу на ринок важливо визначити ключові фактори, що формують його конкурентні переваги. Вони показують, які характеристики продукту є найбільш значущими для клієнтів і на яких аспектах слід зосередити розвиток. Таблиця 5.8 узагальнює основні фактори конкурентоспроможності та пояснює, чому саме вони визначають успіх рішення на ринку екологічного моніторингу з використанням БПЛА.

Таблиця 5.8. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що роблять фактор значущим)
Точність та достовірність екологічних вимірювань	Замовники очікують не просто «картинку», а коректні числові показники (CO ₂ , PM2.5, t°, RH, тиск), які можуть бути використані для прийняття управлінських рішень, звітів перед контролюючими органами та участі в екологічних програмах. Висока точність вимірювань та калібрування сенсорів формують довіру до системи та відрізняють її від дешевих непрофесійних рішень.
Мобільність та оперативність отримання даних	БПЛА дозволяє швидко обстежити великі території (промзони, житлові масиви, прифронтові території, агрополя) без встановлення стаціонарних станцій. Це важливо для надзвичайних ситуацій, разових обстежень або моніторингу важкодоступних зон. Оперативність є критичною перевагою над стаціонарними постами та супутниковими даними.
Інтеграція з GIS та аналітичними платформами	Користувачам потрібна не лише «таблиця з цифрами», а просторово прив'язані карти забруднення, теплові карти, часові тренди. Інтеграція з GIS (QGIS, ArcGIS) і панелями моніторингу (Grafana, Power BI) збільшує цінність продукту та робить його частиною цифрової інфраструктури Smart City / підприємства.
Зручний інтерфейс користувача (оператора та замовника)	Оператори БПЛА та представники замовника не завжди є фахівцями з програмування. Інтуїтивно зрозумілий UI/UX для планування місій, перегляду даних, формування звітів зменшує поріг входу та скорочує час навчання персоналу, що важливо для муніципалітетів, підприємств та НДІ.
Масштабованість та модульна архітектура системи	Можливість підключати нові сенсори, нові регіони, декілька БПЛА, нові сценарії місій робить систему привабливою для довгострокової співпраці. Клієнт може почати з «пілота» на одній території та поступово розширювати обсяг моніторингу.
Гнучка модель співпраці (послуга, підписка, проєкт під ключ)	Різні категорії клієнтів мають різні можливості фінансування. Наявність декількох форматів співпраці (разові вимірювання, регулярна підписка, довгострокові контракти, спільні грантові проєкти) підвищує шанси на залучення замовників.

Аналіз факторів конкурентоспроможності показує, що успіх стартапу базується на поєднанні технічної точності, мобільності, якісної аналітики та зручності користування. Найбільшу цінність для клієнтів становлять достовірні дані, швидке їх отримання та можливість інтегрувати результати в існуючі цифрові платформи.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту

На основі визначених факторів конкурентоспроможності (табл. 5.8) проводиться порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту відносно основних конкурентів.

Таблиця 5.9. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту

Фактор конкурентоспроможності	Вага, бали (1–20)	Рейтинг відносно конкурентів (–3...+3)	Короткий коментар
Точність та достовірність екологічних вимірювань	18	0	Рівень точності зіставний з професійними рішеннями, але потребує постійного калібрування сенсорів.
Мобільність та оперативність отримання даних	19	+3	Значна перевага над стаціонарними постами та лабораторіями завдяки використанню БПЛА.
Інтеграція з GIS та аналітичними платформами	17	+2	Забезпечується просторово-часова прив'язка даних і побудова карт/дашбордів, що є сильнішою стороною проєкту.
Зручність інтерфейсу користувача (оператора та замовника)	16	+2	Інтерфейс орієнтовано на «не технічного» користувача, що спрощує впровадження на підприємствах та в громадах.
Масштабованість та модульна архітектура системи	15	+1	Є можливість розширення (нові сенсори, території, БПЛА), однак потрібні додаткові ресурси для масштабування.
Гнучка модель співпраці (послуга, підписка, проєкти під ключ, гранти)	14	+2	Пропонуються різні формати взаємодії із замовниками, що вигідно відрізняє стартап від «жорстких» моделей конкурентів.

Модульність системи та гнучкі формати співпраці додатково підвищують привабливість рішення для різних сегментів ринку. Це формує стійкі конкурентні переваги та створює потенціал для довгострокового розвитку проєкту.

SWOT-аналіз стартап-проєкту

На основі аналізу конкурентного середовища (табл. 5.9), факторів загроз та можливостей (табл. 5.5-5.6), можна сформулювати наступну таблицю 5.10 SWOT-аналіз стартап-проєкту.

Таблиця 5.10. SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: Мобільність та можливість оперативного моніторингу у будь-якій локації. Інтеграція з GIS-системами та аналітичними панелями. Сучасний, зручний інтерфейс для оператора та замовника. Модульна архітектура з можливістю розширення сенсорного складу. Гнучка модель співпраці (разові послуги, підписка, грантові проєкти).	Слабкі сторони: Залежність від погодних умов і регуляторних обмежень на польоти БПЛА. Початково обмежений парк БПЛА та сенсорів (стартап-етап). Необхідність постійної технічної підтримки та калібрування обладнання. Висока чутливість до змін курсу валют і вартості імпортованих компонентів. Потреба у формуванні довіри до нового підходу (частина клієнтів звикла до стаціонарних методів).
Можливості: Зростання попиту на екологічний моніторинг у містах та промзонах. Поширення концепцій Smart City та Industry 4.0. Наявність грантових та міжнародних програм підтримки екологічних та інноваційних проєктів. Потреба у швидкому моніторингу під час надзвичайних ситуацій. Можливість інтеграції з існуючими дрон-сервісами та лабораторіями.	Загрози: Зміни у законодавстві щодо використання БПЛА. Вихід на ринок великих міжнародних гравців із потужними ресурсами. Посилення конкуренції з боку стаціонарних систем та супутникових платформ. Економічна та політична нестабільність, що впливає на бюджети клієнтів. Перебої з постачанням обладнання або різке зростання його вартості.

SWOT-аналіз показує, що стартап має сильні технологічні та функціональні переваги - мобільність, інтеграцію з аналітичними системами, модульність і гнучкі формати співпраці.

Водночас проєкт стикається з низкою ризиків: регуляторні обмеження, конкуренція з боку великих компаній та залежність від імпортованих компонентів. Для успішного розвитку необхідно посилювати технічну стабільність, формувати довіру клієнтів і активно використовувати можливості співпраці та інтеграції з іншими сервісами.

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

На основі результатів SWOT-аналізу формуються альтернативи (табл. 5.11) ринкової поведінки, які описують можливі стратегії виходу проєкту на ринок. Кожна альтернатива оцінюється з точки зору ймовірності отримання ресурсів та строків реалізації.

Таблиця 5.11. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Акцент на швидкому виході на локальний ринок, демонстраційних проектах з муніципалітетами та промисловими підприємствами, побудові портфелю кейсів, активній роботі з регуляторами та участі у профільних подіях.	Середня	12–18 місяців
Стратегія компенсації слабких сторін за рахунок ринкових можливостей. Основний акцент – на отриманні грантового фінансування, участі у міжнародних програмах, партнерстві з лабораторіями та дрон-компаніями. Розширення парку БПЛА та сенсорів, підсилення технічної підтримки за рахунок залучених ресурсів.	Висока (за умови активної грантової діяльності)	18–24 місяці
Консервативна стратегія нішевого виходу. Орієнтація на один-два вузькі сегменти (наприклад, моніторинг промислових зон або агросектор), мінімізація інвестицій, обмежена географія, повільне масштабування після отримання стабільного потоку замовлень.	Висока, але із повільним зростанням	24+ місяці

Обрана альтернатива

Найбільш доцільним є вибір альтернативи №2 — стратегії компенсації слабких сторін за рахунок ринкових можливостей. Вона дає змогу використати гранти й партнерства для розширення ресурсів, збільшити парк обладнання без значних витрат та підвищити довіру через співпрацю з лабораторіями й міськими структурами. Надалі стратегія буде деталізована у ринковій, бізнесовій та маркетинговій частинах проєкту.

Розроблення ринкової стратегії проєкту

Визначення стратегій охоплення ринку та вибір цільових груп споживачів

На основі аналізу ринку визначено основні сегменти, зацікавлені у використанні автоматизованої системи моніторингу довкілля з БПЛА. Оцінювання проводилося за готовністю споживачів до інновацій, потенційним попитом, рівнем конкуренції та простотою входу. Це дозволило окреслити структуру потенційних клієнтів і визначити цільові групи (табл. 5.12) для проєкту.

Таблиця 5.12. Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит у сегменті	Інтенсивність конкуренції
Органи місцевого самоврядування (місті ради, департаменти екології)	Висока – потребують оперативних даних для прийняття рішень	Високий (моніторинг повітря, зон забруднення)	Середня
Промислові підприємства (металургія, хімічна промисловість)	Середня – залежать від екологічних аудитів	Високий	Середньо-висока
Агрокомпанії та фермерські господарства	Середня	Середній (моніторинг мікроклімату)	Низька
Екологічні організації, громадські рухи	Висока	Середній	Низька
Науково-дослідні установи	Висока	Середній	Низька

На основі ринкового аналізу було визначено ключові сегменти, які можуть бути зацікавлені в системі моніторингу довкілля з БПЛА. Оцінювалися інноваційна готовність споживачів, потенційний попит, рівень конкуренції та бар'єри входу. Це дало змогу сформуванню структуру потенційних клієнтів і обрати цільові групи для подальшого розвитку проєкту.

Визначення базової стратегії розвитку проєкту

Визначення ринкової стратегії ґрунтується на аналізі конкурентного середовища та специфіки ринку екотехнологій і безпілотних систем. Оскільки більшість компаній пропонують типові рішення, а споживачі потребують сучасних інструментів збору та аналізу даних, для стартапу найбільш раціональним є підхід, що підкреслює унікальні властивості продукту. У таблиці 5.13 подано обґрунтування вибору базової стратегії за М. Портером з урахуванням характеристик ринку та технологічних переваг проєкту.

Таблиця 5.13. Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
Використання ринкових можливостей через партнерства, гранти	Диференційований маркетинг	Мобільність, точність, GIS-аналітика, сучасний UI/UX, гнучка модель співпраці	Стратегія диференціації

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
та створення унікальної аналітики			

Визначення стратегії конкурентної поведінки

Для подальшого ринкового розвитку необхідно визначити стратегію (табл. 5.14) конкурентної поведінки стартапу. Оскільки проект перебуває на ранньому етапі й працює в перспективній, малозаповненій ніші, він фактично виступає першим інноватором у сегменті мобільного екологічного моніторингу з БПЛА, що відповідає моделі ринкового нішера.

Таблиця 5.14. Визначення стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем»?	Залучення нових чи перехоплення існуючих клієнтів?	Чи буде компанія копіювати характеристики лідера?	Стратегія конкурентної поведінки
Так — на ринку відсутні комплексні рішення з БПЛА та повною автоматизацією аналізу	Залучення нових клієнтів + часткове перехоплення у лабораторій та стаціонарних постів	Ні — розробляється власна унікальна аналітична та GIS-інфраструктура	Стратегія заняття конкурентної ніші (нішера)

Аналіз характеристик ринку показує, що проект виступає «першопрохідцем» у сегменті комплексного мобільного моніторингу з БПЛА. Він орієнтується на залучення нових клієнтів і часткове перехоплення попиту у традиційних лабораторій, використовуючи власні технологічні рішення, а не копіюючи лідерів ринку. Це підтверджує доцільність обраної стратегії нішера, яка дозволяє ефективно закріпитися у вузькій, але перспективній ринковій ніші.

Формування стратегії позиціонування проекту

Позиціонування передбачає формування образу продукту у свідомості споживачів та визначення унікальної торговельної пропозиції.

На основі вибраної базової стратегії, ринкової ніші та вимог споживачів, визначено ключові стратегії позиціонування (табл. 5.15).

Таблиця 5.15. Стратегія позиціонування стартап-проекту

Напрямок позиціонування	Опис реалізації	Очікуваний ефект
Позиціонування на основі специфічних відчутних характеристик продукту	Мобільність, точність, різні сенсори, GIS-платформа, дашборди, 3D-візуалізації	Унікальність продукту, чітка відмінність від стаціонарних систем
Позиціонування за співвідношенням «ціна–якість»	Оптимальна вартість послуги, можливість поетапного підключення модулів	Залучення бюджетної та громадської сфери
Позиціонування за сферою застосування	Для міст, підприємств, агросектору, НДІ, екологічного моніторингу в кризових умовах	Формування мультисегментної ринкової присутності
Позиціонування на основі технологічних інновацій	Автоматизований аналіз, хмарні алгоритми, ML-моделі	Репутація високотехнологічного рішення
Позиціонування за сервісністю	Підтримка, консультації, генерація звітів, налаштування місій	Зростання довіри споживача та лояльності

Таблиця показує, що проєкт може ефективно позиціонуватися відразу за кількома напрямками - від технічної унікальності та інноваційності до сервісності та оптимального співвідношення «ціна–якість». Такий багатовекторний підхід дозволяє одночасно охопити різні сегменти ринку, підвищити впізнаваність рішення та сформувати стійку конкурентну перевагу завдяки поєднанню технологічних характеристик, доступності та якісного сервісу.

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

Бізнес-модель Canvas проєкту ґрунтується на створенні комплексного рішення для мобільного екологічного моніторингу, яке поєднує апаратну платформу безпілотного літального апарата, сенсорний модуль для вимірювання параметрів довкілля та програмне забезпечення для збирання, аналізу й візуалізації даних. Такий підхід забезпечує можливість оперативного отримання екологічної інформації у важкодоступних або небезпечних зонах, де традиційні стаціонарні системи є недостатньо ефективними або занадто дорогими.

Ключові партнери Постачальники електроніки (датчики CO ₂ , PM2.5, SHT31, GPS-модулі, плати керування, модулі передачі даних LoRa/Wi-Fi/LTE), виробники акумуляторів та комплектуючих для БПЛА, лабораторії калібрування сенсорів та сертифікаційні центри, партнери з 3D-друку та виготовлення корпусів, університети та наукові інститути (спільні дослідження, пілотні тести), екологічні організації, міські екослужби (потреба у моніторингу), IT-партнери (хмарні сервіси, аналітичні платформи), грантові фонди та стартап-інкубатори (фінансування MVP).	Ключові види діяльності R&D: розробка безпілотного апарата, сенсорного модуля, алгоритмів збору та обробки даних, інтеграція сенсорів та калібрування системи, розробка програмної частини: веб-інтерфейс, база даних, модуль аналітики та візуалізації, моделювання польотів, визначення оптимальних маршрутів збору даних, тестування БПЛА та польові випробування, технічна підтримка клієнтів, оновлення прошивок та ПЗ, підготовка документації, методичних матеріалів та навчальних модулів. Ключові ресурси 1. Апаратна платформа БПЛА (рама, мотори, ESC, живлення). 2. Сенсорний модуль (CO ₂ : MH-Z19B, PM2.5: PMS7003, SHT31, GPS, IMU). 3. Програмне забезпечення: мобільний додаток/веб-панель, аналітична система, база даних. 4. Алгоритми збору, фільтрації, прив'язки до координат. 5. Хмарна інфраструктура для зберігання та обробки даних. 6. Інтелектуальна власність (проектні рішення, 3D-моделі, ПЗ). 7. Команда R&D та інженерно-аналітичний персонал.	Ціннісна пропозиція Мобільна система моніторингу, здатна виконувати вимірювання у важкодоступних або небезпечних зонах, отримання просторово-розподілених екологічних даних у режимі реального часу, інтелектуальна аналітична платформа (фільтрація, агрегація, GIS-відоображення), налаштовувані маршрути польотів та автоматизоване управління, доступна альтернатива дорогим стаціонарним станціям, можливість інтеграції з міськими системами «Smart City», розширення системи за допомогою нових сенсорів (модульність), відкритий API для роботи з даними та машинного аналізу.	Взаємодії з клієнтами Довготривала співпраця через сервісне обслуговування та оновлення ПЗ, персоналізована підтримка (налаштування маршрутів, технічний супровід), навчання користувачів: міні-курси, інструкції, онлайн-гід, демонстраційні польоти та тестування перед впровадженням, створення спільноти користувачів (форум, база знань), автоматичні звіти та аналітичні панелі для клієнтів. Канали збуту Прямі продажі системи (B2B/B2G). Пілотні впровадження для муніципалітетів та університетів. Онлайн-платформа (продаж ПЗ, підписки на аналітику). Виставки, хакатони, освітні конференції (демо-проекти). Партнерські мережі виробників БПЛА та електроніки. Академічні програми (використання у навчальних лабораторіях).	Сегменти споживачів Довготривала співпраця через сервісне обслуговування та оновлення ПЗ, персоналізована підтримка (налаштування маршрутів, технічний супровід), навчання користувачів: міні-курси, інструкції, онлайн-гід, демонстраційні польоти та тестування перед впровадженням, створення спільноти користувачів (форум, база знань), автоматичні звіти та аналітичні панелі для клієнтів.
Структура витрат Закупівля компонентів БПЛА та сенсорів. Витрати на 3D-друк, виробництво корпусів. Хмарні ресурси та сервери. R&D: тестування, моделювання, розробка ПЗ. Маркетинг: сайт, презентації, участь у виставках. Калібрування та технічне обслуговування обладнання. Зарплати команди (розробники, інженери, аналітики).		Потоки доходів Продаж БПЛА з повноцінним сенсорним модулем. Продаж ПЗ: підписки на аналітичну панель та хмарне сховище. Технічне обслуговування, оновлення, післягарантійна підтримка. Консалтинг: побудова маршрутів моніторингу, аналіз даних. Розробка спеціалізованих модулів за запитом клієнтів. Оренда БПЛА для короткострокових екологічних проєктів. Участь у грантах та державних тендерах.		

Рисунок 5.1 – Бізнес модель Canvas

Маркетингова програма стартап-проєкту формує комплекс рішень щодо товару, ціни, збуту та комунікацій, які забезпечують вихід продукту на ринок та його подальшу комерціалізацію. Вона спирається на результати попереднього аналізу конкурентоспроможності, оцінку потенційних клієнтів, ринкових можливостей та загроз, а також на обрану стратегію ринкової поведінки.

Маркетингова концепція товару

Для формування маркетингової концепції товару необхідно визначити ключові потреби споживачів, вигоди, які надає продукт, та переваги, що забезпечують його конкурентоспроможність. Таблиця 5.16 узагальнює результати аналізу ринку та демонструє, які саме характеристики мобільної системи екологічного моніторингу з БПЛА є найбільш цінними для цільових сегментів користувачів.

Таблиця 5.16. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба споживача	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
Оперативне вимірювання параметрів довкілля в будь-якій локації	Мобільний моніторинг з можливістю швидкого обльоту територій	Робота у важкодоступних та небезпечних зонах без ризику для людини

Потреба споживача	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
Достовірні та точні екологічні дані	Калібровані сенсори та автоматизована обробка вимірювань	Вища точність порівняно з низькобюджетними рішеннями, мінімізація людського фактору
Наглядність та зручна візуалізація результатів	Теплові карти, 3D-візуалізації, інтеграція з GIS	Комплексна цифрова аналітика «все в одному»
Можливість комплексного аналізу кількох показників	Мультимодальні сенсори (CO ₂ , PM2.5, t°, RH, тиск)	Один пристрій замінює декілька стаціонарних постів
Зменшення витрат на моніторинг	Оптимальна ціна послуги та масштабованість	Значно нижча вартість у порівнянні зі стаціонарними станціями
Гнучкі умови співпраці	Разові вимірювання, підписка, тривалі контракти	Адаптація під потреби кожного сегмента клієнтів

Поданий аналіз показує, що розроблюваний продукт задовольняє одразу кілька важливих потреб споживачів: оперативність, точність, наочність, комплексність та економічність моніторингу. Завдяки мобільності, високій якості даних, мультимодальному сенсорному блоку та гнучким умовам співпраці система має суттєві переваги над існуючими рішеннями. Це формує сильний конкурентний потенціал товару та підтверджує доцільність його виведення на ринок.

Трирівнева маркетингова модель товару

Для повного розуміння сутності розроблюваного продукту доцільно застосувати трирівневу модель товару, яка дозволяє розглянути його від концептуальної ідеї до реального виконання та сервісного супроводу. Такий підхід дає змогу системно описати ключові характеристики системи екологічного моніторингу з використанням БПЛА та визначити, які елементи забезпечують її функціональність, цінність для споживача та конкурентоспроможність.

Таблиця 5.17. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Базова потреба, яку задовольняє товар — оперативний, точний та мобільний екологічний моніторинг у будь-якій локації, включно з важкодоступними й небезпечними територіями. Основна функціональна вигода — отримання достовірних даних з повітря та автоматизована обробка результатів для оцінки стану довкілля.

Рівні товару	Сутність та складові
II. Товар реальному виконанні	Властивості/характеристики (М/Нм/Вр/Тх/Тл/Е/Ор): 1. Набір сенсорів CO₂, PM2.5, t°, RH, тиск — Технічні (Тх) 2. Бортова програма збору та передавання даних — Технологічні (Тл) 3. Дрон-квадрокоптер з автопілотом — Призначення (Вр) 4. Інтерфейс оператора та клієнта — Ергономічні (Е) 5. GIS-платформа з тепловими картами — Нормативні/технічні (Нм) 6. Автоматизована аналітика — Органолептичні/ергон. (Ор/Е) Якість: калібрування сенсорів; відповідність екологічним нормам; тестування на реальних даних; стабільність передачі інформації. Пакування: програмне забезпечення + захисний кейс-тримач сенсорного модуля. Марка: EcoAirScan UAV System.
III. Товар підкріпленням	До продажу: консультації, демонстраційні місії, адаптація під потреби замовника. Після продажу: технічна підтримка, оновлення ПЗ, гарантійне обслуговування, регулярне калібрування сенсорів, формування аналітичних звітів та теплових карт. Додаткові послуги: навчання операторів, супровід польотів, гнучкі умови співпраці (разові вимірювання, підписка, грантові програми). Захист від копіювання: власні алгоритми аналітики, авторські GIS-модулі, унікальна конфігурація сенсорного блоку, можливість патентування конструктивних рішень.

Трирівнева модель товару демонструє, що система екологічного моніторингу на базі БПЛА має як чітко сформовану базову ідею, так і комплексну технічну реалізацію та продуманий сервісний супровід. Поєднання мобільної платформи, мультимодального сенсорного модуля, програмної аналітики та додаткових послуг дозволяє розглядати продукт як завершене інноваційне рішення. Така структура забезпечує високу корисність для різних категорій споживачів, формує додаткову цінність і створює основу для ефективного просування та комерціалізації проєкту.

Техніко-економічні характеристики товару

Для повної оцінки функціональних можливостей та ринкової привабливості розробленої системи екологічного моніторингу необхідно проаналізувати її техніко-економічні характеристики. Ці показники дозволяють комплексно розглянути товар з позиції його вартості, технічного призначення, надійності, ергономічності, безпеки та впливу на довкілля. У таблиці 5.18 наведено систематизовану оцінку основних груп показників, що визначають якість і придатність продукту до практичного використання у сфері мобільного екологічного моніторингу на базі БПЛА.

Таблиця 5.18. Техніко-економічні характеристики товару (для системи екологічного моніторингу на базі БПЛА)

№	Група показників	Склад показників
1	Економічні	Вартість обслуговування БПЛА та сенсорного модуля; витрати на калібрування сенсорів CO ₂ , PM2.5, SHT31; енергоспоживання та заміна акумулятора; витрати на хмарне зберігання; ремонт і оновлення ПЗ; доступність пільгових тарифів/пакетів для муніципалітетів та НДІ.
2	Призначення (технічні)	Основне призначення — мобільний моніторинг довкілля з повітря. Показники: перелік сенсорів (CO ₂ MH-Z19B, PM2.5 PMS7003, SHT31, барометр), маса сенсорного модуля, розмір і тип дрона, швидкість польоту, можливість роботи на висоті, підтримка автономних маршрутів, діапазон вимірювань і точність.
3	Надійності	Безвідмовність роботи сенсорів у польоті, стійкість до вібрацій та змін температури; гарантійний термін; стабільність передачі даних; ресурс акумулятора; ремонтпридатність сенсорного блоку; наявність функцій «Return to Home» та захисту від втрати зв'язку.
4	Технологічні	Технологічність монтажу сенсорів; легкість інтеграції модулів з PX4 / ArduPilot; можливість швидкої заміни сенсорів; технологічна собівартість виготовлення сенсорного блоку; автоматизоване калібрування; оптимізація маршруту польоту; хмарна аналітика як сервіс.
5	Ергономічні	Зручність інтерфейсу оператора; читабельність даних на планшеті/ПК; інтуїтивне планування місій; мінімальне навантаження на користувача під час аналізу результатів; комфорт управління дроном; доступність навчальних матеріалів; зручність обслуговування сенсорного модуля.
6	Органолептичні	Візуальна зрозумілість теплових карт та графіків; чіткість позначення аномалій; сприйняття інтерфейсу користувачем; зручність інтерпретації даних; «збалансованість» візуальної аналітики для нефахівців.
7	Естетичні	Стильний та компактний вигляд сенсорного модуля; логічне розташування елементів; сучасний дизайн інтерфейсу; фірмовий стиль EcoAirScan (або інша назва); стабільність зовнішнього вигляду після тривалого використання; візуальна привабливість аналітичних панелей.

№	Група показників	Склад показників
8	Транспортабельності	Наявність захисного кейса; невелика вага модуля; зручність перевезення у рюкзаку/кейс-сумці; швидка підготовка до роботи (1–2 хв); простота кріплення на дрон; мінімальний час монтажу/демонтажу; безпечне транспортування акумуляторів.
9	Екологічності	Низьке енергоспоживання; відсутність шкідливих викидів; безпечна утилізація акумуляторів; можливість моніторингу без шкоди довкіллю; мінімальна шумова дія; відповідність екологічним стандартам щодо вимірювань.
10	Безпеки	Наявність захисних функцій автопілота; електрична безпека сенсорного модуля; аварійні сигнали у разі втрати зв'язку; безпечні матеріали корпусу; можливість роботи оператора на безпечній відстані; мінімізація ризику падіння БПЛА; відповідність нормам авіаційної безпеки.

Аналіз техніко-економічних показників показує, що проєктована система поєднує високу функціональність, мобільність та інженерну надійність. Сукупність економічних, технічних, ергономічних і безпекових параметрів свідчить про відповідність продукту вимогам сучасних екологічних технологій та можливість його ефективного застосування в різних умовах - від міських територій до зон надзвичайних ситуацій.

Визначення меж встановлення ціни

Для обґрунтованого формування ціни на розроблений продукт необхідно визначити межі її встановлення з урахуванням ринкової ситуації, вартості товарів-замінників і аналогів, а також платоспроможності цільових груп споживачів. Такий підхід дозволяє сформувати реалістичний діапазон вартості послуги екологічного моніторингу на базі БПЛА та оцінити її конкурентоспроможність у різних сегментах ринку. У таблиці 5.19 наведено результати експертного аналізу, який визначає можливі нижні та верхні межі ціни.

Таблиця 5.19. Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Стационарні станції моніторингу повітря: 350 000 – 1 000 000 грн за один пост (висока вартість, складна інсталяція).	Послуги дрон-моніторингу або мобільних лабораторій: 10 000 – 60 000 грн за одну сесію вимірювань.	Органи місцевої влади та підприємства: середній рівень бюджету, можливість фінансування за тендерами/екoproграмами.	Нижня межа: 8 000 – 10 000 грн за одну місію. Верхня межа: 40 000 – 50 000 грн за одну місію або пакетну підписку.
2	Мобільні лабораторії повітря: 200 000 – 500 000 грн за виїзд (висока собівартість).	Послуги геодезичних/інспекційних дронів: 15 000 – 80 000 грн.	Промислові підприємства та агросектор: стійкий середній/високий бюджет, залежно від масштабу.	Нижня межа: 15 000 грн. Верхня межа: 60 000 грн за комплексну місію з аналітикою.
3	Супутникові дані (низька роздільність): від безкоштовних до 5 000 грн/рік за доступ до архівів.	Аналоги — інші дрон-рішення без аналітики: 8 000 – 20 000 грн.	НДІ, навчальні заклади: обмежений бюджет, залежність від грантів і проєктного фінансування.	Нижня межа: 5 000 – 7 000 грн. Верхня межа: 15 000 – 20 000 грн за вимірювання з аналітикою.
4	Портативні ручні сенсори (низька точність): 3 000 – 15 000 грн.	Часткові аналоги — прості системи «дрон + камера без екосенсорів»: 5 000 – 12 000 грн.	Невеликі компанії, локальні ініціативи: низький/середній бюджет, потреба у доступних рішеннях.	Нижня межа: 3 000 – 5 000 грн. Верхня межа: 10 000 – 12 000 грн за спрощену послугу.

Наведений аналіз показує, що оптимальна ціна на послугу мобільного моніторингу довкілля має формуватися в межах, які відповідають ринковим аналогам, але враховують додаткову цінність продукту - швидкість, мобільність та автоматизовану аналітику. Отримані цінові діапазони свідчать, що послуга може бути доступною для різних груп споживачів: від муніципалітетів та промисловості до наукових установ і локальних ініціатив.

Формування системи збуту

Формування ефективної системи збуту є ключовим елементом ринкової стратегії стартап-проєкту, оскільки від правильного вибору каналів дистрибуції залежить доступність продукту для споживача, швидкість його впровадження та рівень довіри до технології. У таблиці 5.20 систематизовано основні варіанти збуту з

урахуванням специфіки закупівельної поведінки різних груп клієнтів, необхідних функцій постачальника та оптимальної глибини каналу збуту для кожного сегмента.

Таблиця 5.20. Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Органи місцевого самоврядування та департаменти екології діють через тендерні закупівлі, вимагають офіційної документації та технічних підтверджень.	Проведення демонстрацій, надання технічної документації, підготовка тендерних пропозицій, консультаційна підтримка.	Канал нульового рівня (прямий збут).	Прямий продаж без посередників + власні торгові агенти.
2	Промислові підприємства орієнтовані на довгострокове партнерство, сервісне обслуговування та швидке реагування на запити.	Інтеграція продукту під конкретні потреби, технічна підтримка, післяпродажне обслуговування, формування технічних звітів.	Один рівень каналу (виробник → торговий представник → клієнт).	Прямі продажі + торгові представники, що забезпечують персональну комунікацію.
3	Будівельні компанії, кар'єри та інфраструктурні проєкти мають потребу в оперативному виїзді та швидких вимірюваннях за гнучкою ціною.	Оперативна логістика, швидке укладання договорів, консультації на місці, гнучка цінова пропозиція.	Нульовий або однорівневий канал.	Власна система збуту + можливе залучення договірних збутовиків.
4	Наукові установи та університети орієнтуються на гранти, відкритість даних і можливість кастомізації.	Надання методичних матеріалів, налаштування аналітики, навчання персоналу, технічна підтримка.	Нульовий рівень (напряму від виробника).	Прямий збут через цифрові канали + співпраця через грантові програми.
5	Служби реагування (ДСНС, штаби НС) потребують швидкого розгортання системи, високої надійності та контрактного обслуговування.	Швидка доставка/виїзд, сервіс 24/7, навчання операторів, технічна готовність до роботи в НС.	Один рівень (виробник → торговий агент).	Прямий продаж + спеціалізовані агенти з високим рівнем технічної компетентності.

Аналіз можливих систем збуту показує, що для високотехнологічного продукту, яким є система екологічного моніторингу на базі БПЛА, найбільш ефективним є прямий продаж із мінімальною участю посередників. Такий підхід забезпечує якісну комунікацію з клієнтами, можливість демонстрації продукту,

швидку технічну підтримку та адаптацію рішення під конкретні потреби. Разом із тим окремі сегменти потребують залучення торгових представників або договірних збутовиків, що дозволяє розширити охоплення ринку. У комплексі це формує гнучку систему збуту, здатну забезпечити стабільне та ефективне просування продукту на ринку.

Концепція маркетингових комунікацій

Для ефективного просування автоматизованої системи моніторингу довкілля на базі БПЛА необхідно врахувати поведінкові особливості цільових клієнтів, їхні канали отримання інформації та ключові переваги, які вони очікують від продукту. Таблиця 5.21 узагальнює ці аспекти та формує основу концепції маркетингових комунікацій, що допоможе правильно донести цінність розробленого рішення до кожного сегмента споживачів.

Таблиця 5.21. Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Муніципалітети: орієнтація на прозорість, безпеку та швидке реагування	Офіційні презентації, публічні заходи, електронні листи	Оперативність, точність, Smart City	Показати користь для громад та служб реагування	«Миттєвий контроль якості повітря для безпечних міст»
2	Промислові підприємства: прагнення мінімізувати ризики та витрати	Ділові зустрічі, галузеві форуми, B2B-реклама	Мобільність, відповідність нормам, економія	Довести, що система знижує витрати та покращує екоконтроль	«Контроль викидів без зупинки виробництва»
3	Наукові установи: інтерес до достовірних даних	Наукові заходи, соцмережі, тематичні платформи	Якість вимірювань, широкі сенсорні можливості	Підкреслити точність і придатність для досліджень	«Дані, яким довіряють дослідники»

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
4	Агросектор: потреба у моніторингу великих площ	Онлайн-платформи, демонстраційні польоти	Масштабованість, швидкість збору даних	Показати ефективність моніторингу полів	«Контроль стану повітря над великими площами за хвилини»
5	Екологічні організації, NGO	Соцмережі, медіа-кампанії	Візуалізація, прозорість, доступність	Підкреслити громадську цінність	«Екологічний моніторинг, який бачить кожен»

Сформована концепція маркетингових комунікацій забезпечує узгодженість між потребами різних груп клієнтів, каналами передачі інформації та ключовими перевагами продукту. Завдяки цьому стартап отримує цілісну систему просування, яка підтримує його позиціонування як інноваційного й надійного рішення для моніторингу довкілля.

Економічна ефективність

Оцінювання фінансових показників стартап-проєкту є важливим етапом його планування та подальшої реалізації. Для визначення життєздатності та інвестиційної привабливості системи екологічного моніторингу на базі БПЛА необхідно проаналізувати структуру витрат, очікувані доходи, точку беззбитковості та потенційний рівень рентабельності. Така оцінка дозволяє сформувати реалістичну економічну модель, визначити обсяги початкових інвестицій, оцінити можливі ризики та спрогнозувати терміни окупності проєкту. У цьому підрозділі наведено розрахунки ключових показників, що дають змогу обґрунтувати економічну доцільність впровадження розробленої системи.

Таблиця 5.22. Витрати та інвестиції стартап проєкту

№	Стаття витрат	Характеристика	Орієнтовні початкові витрати, \$
1	Стартова закупівля компонентів	Перша партія комплектуючих для зборки 30 демонстраційних БПЛА (двигуни, контролери, сенсори, акумулятори, корпуси, ЗП тощо).	\$7 000 – \$11 000
2	R&D та документація	Розробка ПЗ, алгоритмів обробки даних, технічна документація, методичні матеріали для користувачів.	\$5 000 – \$7 000
3	Маркетинг та просування	Створення сайту, презентацій, відео-контенту, участь у виставках та профільних конференціях.	\$2 500 – \$4 500
4	Операційні та організаційні витрати	Реєстрація ФОП/компанії, оренда мінімального офісу/складу на 3 міс., базові адміністративні витрати.	\$4 000 – \$6 000
5	Резервний фонд (на ризику Т3, Т5)	Резерв на випадок браку компонентів, коливань цін або логістичних затримок.	\$2 000 – \$4 000
	ЗАГАЛЬНІ ПОЧАТКОВІ ІНВЕСТИЦІЇ (капітальні витрати)		\$20 500 – \$32 500 (базовий розрахунковий сценарій – ≈\$26 500)

Вихідні припущення для розрахунків:

1. Планова середня собівартість одного комплекту (сенсорний модуль + 3D-друк корпусу + збірка) – ≈\$240.

2. Середня ціна продажу комплексу (БПЛА з сенсорами + ПЗ + базова підтримка) – ≈\$650.

3. Валова маржа з одного комплекту:

$$650 - 240 = 410 \$ \rightarrow \approx 63 \%$$

4. Фіксовані витрати для виходу на ринок – \$26 500 (з табл. 5.22).

5. Точка беззбитковості:

$$Q_{BE} = \frac{26500}{650-240} \approx 65 \text{ комплектів}, \quad (5.1)$$

Таблиця 5.22. Витрати та інвестиції стартап проекту

№	Показник	Орієнтовна оцінка	Обґрунтування
1	Собівартість 1 комплекту (компоненти + 3D-друк)	≈\$240	Оптова закупівля сенсорів та електроніки, використання 3D-друку й власної збірки дозволяють утримувати собівартість на рівні, прийнятному для роботи у B2B-сегменті.
2	Середня ціна продажу	≈\$650	Ціна знаходиться в типовому діапазоні для спеціалізованих екологічних рішень на базі БПЛА, достатня для покриття R&D та маркетингових витрат.
3	Валова маржа (Gross Margin)	≈63 % (маржа ≈\$410)	Висока маржинальність дозволяє фінансувати подальший розвиток ПЗ та сенсорних модулів, що відповідає стратегії інноваційного диференціювання.
4	Точка беззбитковості (ТБЗ)	≈60–70 комплектів	При валовій маржі близько \$410 за комплект потрібно реалізувати ≈65 комплектів для покриття початкових інвестицій у \$26 500.
5	Термін окупності інвестицій	≈15–18 місяців	За умови продажу 4–5 комплектів на місяць після виходу на ринок початкові інвестиції окупаються приблизно за 1,5 року.
6.	Середня норма рентабельності	≈25 % (Net Profit Margin)	Чистий прибуток після сплати податків та операційних витрат становить близько 25 % від виручки, що перевищує дохідність банківських депозитів і підтверджує економічну доцільність проєкту.

Проведений аналіз показав, що стартап-проєкт має стабільний економічний потенціал та може бути успішно реалізований за умови помірних стартових інвестицій. Розрахована собівартість виробу, висока валова маржинальність та прийнятний термін окупності свідчать про конкурентоспроможність рішення і можливість його масштабування на різні сегменти ринку. Досягнення точки беззбитковості після продажу приблизно 60–70 комплектів підтверджує фінансову стійкість моделі й дозволяє прогнозувати подальше зростання прибутковості. Таким чином, проєкт є економічно обґрунтованим та має перспективи подальшого розвитку у сфері екологічного моніторингу.

5.5. Висновок

Проведений аналіз ринкових, технологічних та економічних аспектів свідчить, що розробка мобільної автоматизованої системи екологічного моніторингу на базі БПЛА є актуальною, технічно здійсненою та комерційно перспективною. Запропоноване рішення поєднує мобільність, високу точність мультимодальних сенсорів, можливість роботи у важкодоступних і небезпечних зонах та розвинену аналітичну платформу, що забезпечує значну перевагу над стаціонарними постами, портативними приладами та високовартісними професійними комплексами.

Результати порівняльного аналізу показали, що стартап займає оптимальну нішу між дорогими інженерними рішеннями та малоточними бюджетними сенсорами, пропонуючи унікальне поєднання функціональності, мобільності та доступності. Технологічний аудит підтвердив, що всі необхідні апаратні та програмні компоненти доступні для впровадження, а відкриті платформи PX4/ArduPilot, сучасні сенсори та хмарні інструменти аналітики дозволяють скоротити витрати на R&D і пришвидшити вихід на ринок.

Ринковий аналіз продемонстрував наявність сталого попиту з боку промислових підприємств, муніципалітетів, наукових установ, агросектору та служб реагування, що забезпечує широкі можливості сегментації та масштабування продукту. SWOT-аналіз та оцінка конкурентного середовища вказують на сильні технологічні позиції проєкту та реальні перспективи його розвитку за рахунок партнерств, грантових програм і гнучкої моделі співпраці.

Економічні розрахунки підтвердили фінансову доцільність стартапу: собівартість одного комплексу залишається низькою, валова маржа є високою, а орієнтовний термін окупності — 15–18 місяців. Досягнення точки беззбитковості після продажу приблизно 60–70 комплектів демонструє стабільність бізнес-моделі та потенціал подальшого зростання.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що створення автоматизованої системи екологічного моніторингу з використанням БПЛА є перспективним напрямом,

здатним забезпечити значну практичну користь, сформувати нові стандарти у сфері моніторингу довкілля та успішно конкурувати на сучасному ринку екотехнологій.

Висновок

У магістерській дисертації проведено комплексне дослідження, спрямоване на розроблення автоматизованої системи збору та аналізу даних про параметри довкілля з використанням безпілотного літального апарата. Актуальність роботи зумовлена потребою у сучасних високоточних засобах екологічного контролю, здатних забезпечувати оперативність, просторову гнучкість та високу інформативність вимірювань у реальних умовах.

У ході виконання роботи здійснено аналітичний огляд сучасних технологій моніторингу довкілля, досліджено методи збору, передавання та обробки екологічних даних, визначено переваги використання БПЛА у мобільних вимірювальних системах. Узагальнення літературних джерел дозволило сформулювати вимоги до архітектури системи, критерії ефективності та параметри, які є критично важливими для надійного екологічного моніторингу.

Розроблено структурну та функціональну архітектуру автоматизованої системи, що включає сенсорний комплекс, бортовий комп'ютер, комунікаційний модуль, наземну станцію та аналітичний програмний блок. Обґрунтовано вибір кожного компонента, визначено взаємодію між підсистемами та побудовано структурні схеми, що відображають логіку роботи системи.

Особливу увагу приділено моделюванню процесів функціонування системи. У середовищі MATLAB/Simulink реалізовано математичну модель руху БПЛА з урахуванням впливу вітру, а також моделі сенсорів, які враховують шум, вібрації, дискретність вимірювання та затримки. Створено моделі каналу зв'язку, що дозволило проаналізувати вплив завад, втрат пакетів та нестабільності сигналу. Результати моделювання показали, що система здатна забезпечувати стабільний збір даних та їхню передачу до наземної станції навіть за умов зовнішніх впливів.

Розроблені алгоритми обробки даних охоплюють фільтрацію, інтерполяцію, агрегацію, просторову прив'язку та візуалізацію у вигляді теплових карт і часових графіків. Це забезпечило можливість створення повноцінного аналітичного інструменту, придатного для використання у практичних екологічних задачах.

Важливою складовою роботи стала розробка стартап-проєкту, що демонструє перспективи комерціалізації створеної системи. Проведено технологічний аудит, аналіз ринкових можливостей, визначено цільові сегменти користувачів, описано бізнес-модель та економічні показники, що підтверджує потенційну конкурентоспроможність розробки.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування БПЛА для екологічного моніторингу та доводять можливість інтеграції апаратних, програмних і аналітичних рішень у єдину автоматизовану систему. Розроблена система є гнучкою, масштабованою та здатною до адаптації під різні сценарії моніторингу – від локальних вимірювань до регіональних екологічних досліджень.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а всі завдання виконані. Результати можуть бути використані в екологічних службах, наукових установах, органах місцевого самоврядування та підприємствах, що потребують оперативного контролю стану довкілля. Напрацьований матеріал створює основу для подальших досліджень, зокрема удосконалення каналів передачі даних, розширення сенсорного комплексу, впровадження алгоритмів машинного навчання та створення повністю автономних систем моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Environmental Monitoring Solutions / LI-COR [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: <https://mirnyk.com/pua/li-cor-environmental/>
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». – ВВР України, 1991, № 41, ст. 546.
3. Омеляненко В. І., Ляшенко В. А., Сергієнко О. А. Інноваційні технології екологічного моніторингу. – Київ : ІПЕ НАН України, 2025. – 214 с.
4. Епіфанов А. О. (ред.). Сучасні та перспективні методи і моделі управління природними ресурсами. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – 356 с.
5. Мирний К. С. Системи моніторингу довкілля. Екологічний вісник, 2020. – №4. – С. 12–19.
6. Ковальчук Т. В. Автоматизовані системи збору та обробки екологічних даних. Наукові праці НУБіП, 2022. – №312. – С. 45–52.
7. WHO. Air Quality Guidelines. Global Update 2018. – Copenhagen: WHO Europe, 2018. – 303 p.
8. Li W., Gong P. UAV remote sensing for ecological monitoring... Remote Sensing of Environment, 2021. – Vol. 252.
9. ДСТУ 8724:2017. Якість повітря. Автоматизовані системи вимірювання. – Київ : Мінекономрозвитку, 2017. – 54 с.
10. EPA. Air Sensor Guidebook. – Washington : US EPA, 2021. – 145 p.
11. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems... ISPRS Journal..., 2014. – Vol. 92. – P. 79–97.
12. MH-Z19B CO₂ Sensor Datasheet. Winsen Electronics, 2022.
13. PMS7003 Laser PM2.5 Sensor Datasheet. Plantower, 2021.
14. SHT31 Sensor Datasheet. Sensirion, 2020.
15. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. UNC Tech Report TR 95-041, 2006.
16. MATLAB Documentation. Signal Processing Toolbox, UAV Toolbox. MathWorks, 2023.
17. Simulink Documentation. MathWorks, 2023.
18. Hartman L. Spline interpolation in sensor data reconstruction. Sensors, 2018.
19. Shepard D. A two-dimensional interpolation function... ACM Conf., 1968.

20. Oliver M., Webster R. Kriging for GIS. Int. J. GIS, 1990.
21. Василенко О. Безпілотні літальні системи: моделювання, навігація та керування. – Київ : НТУУ «КПІ», 2020.
22. Барвінок В. А., Сідоренко В. І. Безпілотні авіаційні комплекси. – Харків : ХАІ, 2021.
23. Марченко О. Ю. Системи керування БПЛА. – Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2019.
24. Третяк М. Д. Застосування БПЛА для моніторингу земної поверхні. – Львів : ЛП, 2020.
25. Антонюк О. В., Кравець В. М. Сенсори та датчики... – Харків : Фоліо, 2021.
26. Костенко Ю. О. Автоматизація екологічного контролю. – Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2022.
27. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
28. Як я зробила свій перший FPV [Електронний ресурс] // TEXTY.org.ua. – Режим доступу: <https://texty.org.ua/articles/113378/yak-ya-zrobyla-svij-pershyj-fpv/> (дата звернення: 01.12.2023).
29. Blender 3D Modeling Tutorials For Beginners: The Ultimate Collection [Електронний ресурс] // Concept Art Empire. – Режим доступу: <https://conceptartempire.com/blender-modeling-tutorials/> (дата звернення: 26.05.2024).
30. Бережний А.О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів... Дис. канд. техн. наук. – Харків: ХНУПС, 2020. – 154 с.
31. Дрозд О. М., Личак О. М. Екологічний моніторинг : підручник. – Київ : Либідь, 2020. – 368 с.
32. Грицик В. В. Моніторинг довкілля : навч. посібник. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 312 с.
33. - Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.
34. Lysenko, Iuliia, et al. "Analysis of Eddy Current Probe Signal Model for Structural Monitoring of Aircraft Materials" Transactions on Aerospace Research, vol. 2025, no. 3,

Łukasiewicz Research Network – Institute Of Aviation, 2025, pp. 1-10.
<https://doi.org/10.2478/tar-2025-0010>

35. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.

36. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.

37. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.

38. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

39. Муравйов О. В. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА / О.В. Муравйов, І.О. Довбиш, Р.М. Галаган, Г.А. Богдан, А.С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73). – № 2. – С. 199-205.

40. Довбиш І. О. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА / І.О. Довбиш, О.В. Муравйов, Р.М. Галаган, Г.А. Богдан, А.С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73). – № 5. – С. 16-21.

41. Довбиш І.О., Муравйов О. В. Залежність алгоритму вибору лідера рою від рівня автономності БПЛА. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Том 34 (73), №6. – С. 84-90.

42. Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.

43. Stelmakh N., Mandrovskaya S. & Galagan R. Application of Resnet-152 neural networks to analyze images from UAV for fire detection. Informatyka, Automatyka, Pomiarzy W Gospodarce I Ochronie Środowiska. 2024. 14 (2). P. 77–82. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5862>