Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Кафедра комп'ютерних систем та робототехніки

До захисту допущено
Кафедрою комп'ютерних систем та робототехніки
протокол №__ від ____ червня 2026 р.

завідувач кафедри _____ Максим ХРУСЛОВ
(підпис)
«___»_____ 2026 р.

Кваліфікаційна робота

здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

«ПРОГРАМНО-АПАРАТНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ДРОНОМ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЙ»

Спеціальність ***151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»***

Освітня програма ***Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології***

Виконавець _____ **Олександр КОЛЯДИНСЬКИЙ**
(підпис)

Науковий керівник _____ **Ольга МОРОЗ**
(підпис)

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена проєктуванню та дослідженню програмно-апаратної системи автоматичного управління дроном, що використовується для здійснення екологічного моніторингу територій.

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 66 сторінок, з яких 50 сторінок основної частини, що містить 17 рисунків, 15 таблиць, 33 найменувань у списку використаних джерел.

Мета роботи: підвищення ефективності екологічного моніторингу шляхом розробки програмно-апаратної системи управління БПЛА та створення і налаштування її імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink.

Об'єкт дослідження: процеси автоматичного керування безпілотними літальними апаратами під час виконання екологічних місій.

Предмет дослідження: методи, алгоритми (ПІД-регулятори) та імітаційні моделі програмно-апаратної системи управління дроном.

У процесі виконання роботи проведено аналіз існуючих систем управління безпілотними літальними апаратами, досліджено засоби телеметричного обміну даними, реалізовано модель системи автоматичного керування та виконано перевірку її працездатності шляхом програмного моделювання.

Результати моделювання підтвердили високу точність утримання траєкторії та ефективність алгоритму збору даних.

Ключові слова: автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, БПЛА, екологічний моніторинг, автоматизація, MATLAB, Simulink, ПІД-регулятор, система автоматичного керування, імітаційне моделювання.

ABSTRACT

The qualification work is devoted to the design and research of a software and hardware drone control system used for environmental monitoring of territories.

The explanatory note to the qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references, and 3 appendices. The total volume of the work is 66 pages, including 50 pages of the main content with 17 figures, 15 tables, 33 references.

The goal of the work: to increase the efficiency of environmental monitoring by developing a software and hardware UAV control system and creating and tuning its simulation model in the MATLAB/Simulink environment.

Object of study: automatic control processes of unmanned aerial vehicles during environmental missions.

Subject of study: methods, algorithms (PID controllers), and simulation models of the software and hardware drone control system.

During the research, an analysis of existing unmanned aerial vehicle control systems was carried out, telemetry data exchange technologies were studied, a model of the automatic control system was developed, and its operability was verified through software simulation.

The obtained results confirmed the functionality of the developed system and demonstrated the possibility of its further use as a basis for creating real automated environmental monitoring complexes using unmanned aerial vehicles.

Keywords: automation and computer-integrated technologies, UAV, environmental monitoring, automation, MATLAB, Simulink, PID controller, automatic control system, simulation modeling.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....6
ВСТУП.....7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ БПЛА ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АРХІТЕКТУР СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ.....11
1.1 Роль БПЛА в автоматизованих системах екологічного моніторингу.....11
1.2 Аналіз принципів побудови систем управління дронами.....14
1.3 Огляд середовищ імітаційного моделювання та обґрунтування вибору MATLAB/Simulink.....16
1.4 Постановка задачі дослідження.....17
1.5 Постановка задачі дослідження.....20
Висновки за розділом 1.....20
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ.....22
2.1 Формування вимог до програмно-апаратної системи екологічного моніторингу….....22
2.2 Розробка структури комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу….23
2.3 Обґрунтування вибору польотного контролера та бортового обладнання 24
2.4 Аналіз та вибір сенсорів екологічного моніторингу.....26
2.5 Аналіз інформаційних потоків та каналів зв'язку.....27
2.6 Формування функціональної структури системи.....28
2.7. Математичний опис сигналів та методів їх обробки.....28
Висновки за розділом 2.....30
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРИ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ.....32
3.1 Математична модель динаміки дрона як об’єкта керування.....32
3.2 Проектування структурної схеми САК у середовищі Simulink….....35

3.2.1 Обґрунтування вибору алгоритму керування….....35
3.2.2 Структура системи керування….....36
3.2.3 Математична модель PID-регулятора.....37
3.2.4 Синтез та налаштування ПІД-регуляторів системи управління.....37
3.3 Алгоритм функціонування програмно-апаратної системи управління дроном.....30
Висновки за розділом 3.....40
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ.....42
4.1 Опис програмного середовища та конфігурація моделі.....42
4.2 Аналіз результатів моделювання та перехідних процесів.....44
4.3 Тестування алгоритму екологічного моніторингу.....47
Висновки за розділом 4.....50
ВИСНОВКИ.....51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....53
ДОДАТКИ.....56

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА	–	Безпілотний літальний апарат
GPS	–	Global Positioning System. Система супутникової навігації для визначення координат.
IMU	–	Inertial Measurement Unit. Блок інерціальних сенсорів (акселерометри, гіроскопи, магнітометри)
RGB	–	Red-Green-Blue. Оптична камера для звичайної кольорової зйомки.
UAV	–	Unmanned Aerial Vehicle. Синонім терміну БПЛА англійською.
TLS	–	Telemetry Link System. Канал передачі телеметричних даних між дроном і базовою станцією.
MAVLink	–	Micro Air Vehicle Link. MAVLink. Двонапрямний протокол передачі повідомлень, розроблений для безпілотних систем.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій характеризується стрімким впровадженням роботизованих систем у сфери, що раніше потребували виключної участі людини [1], [2], [9]. Одним із найбільш перспективних напрямків є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які інтегруються у складні інформаційно-вимірювальні мережі для збору та обробки даних у реальному часі [2], [9], [12].

Особливого значення БПЛА набувають у задачах екологічного моніторингу територій, де необхідні оперативність, мобільність та можливість роботи у важкодоступних або потенційно небезпечних зонах. На відміну від стаціонарних постів спостереження, дрони дозволяють виконувати просторове сканування території, збирати дані з різних висот та передавати результати до наземної станції керування в режимі реального часу [3]–[6].

Актуальність роботи. Екологічний стан територій потребує постійного та оперативного моніторингу, особливо у важкодоступних або потенційно небезпечних зонах. Традиційні методи наземного спостереження часто є високовартісними, обмеженими у просторі та часі або небезпечними для персоналу. Безпілотні літальні апарати, оснащені сучасними сенсорними модулями, стають ключовим інструментом автоматизації екологічного контролю, забезпечуючи високу мобільність та низьку собівартість польотів [3], [4], [6].

Однак розробка та налагодження алгоритмів управління безпосередньо на фізичних прототипах пов'язані з високими ризиками пошкодження обладнання та значними витратами часу. У зв'язку з цим, створення та налаштування точної імітаційної моделі системи управління в середовищі MATLAB/Simulink є актуальним науково-практичним завданням [7], [8], [12]. Це дозволяє не лише безпечно протестувати логіку польоту та стабілізацію дрона, а й оптимізувати параметри регуляторів для досягнення максимальної точності виконання місій моніторингу.

Метою роботи є підвищення ефективності екологічного моніторингу шляхом розробки програмно-апаратної системи управління БПЛА та створення і налаштування її імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink.

Об'єкт дослідження – процеси автоматичного керування безпілотними літальними апаратами під час виконання екологічних місій.

Предмет дослідження – методи, алгоритми (ПІД-регулятори) та імітаційні моделі програмно-апаратної системи управління дроном.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасні технічні рішення у сфері БПЛА для екологічного моніторингу.

2. Обґрунтувати вибір польотного контролера, навігаційних та екологічних сенсорів.

3. Розробити математичну модель динаміки квадрокоптера як об'єкта керування.

4. Синтезувати та налаштувати алгоритми стабілізації й навігації на основі PID-регуляторів.

5. Реалізувати імітаційну модель системи в MATLAB/Simulink із підтримкою телеметричного обміну та віртуальних сенсорів.

6. Провести тестування моделі та оцінити якість перехідних процесів і точність виконання маршруту.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань використано методи теорії автоматичного керування (ТАК), математичне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та системний аналіз при виборі апаратних засобів.

Практичне значення роботи полягає у створенні імітаційної моделі програмно-апаратної системи управління дроном, яка може бути використана для відпрацювання алгоритмів стабілізації, навігації та екологічного моніторингу перед їх перенесенням на реальну платформу на базі Pixhawk/STM32.

Робота відповідає спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», оскільки охоплює задачі синтезу систем автоматичного керування,

інтеграції сенсорів, телеметричного обміну даними та імітаційного моделювання складного динамічного об’єкта.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1 Запропоновано структуру програмно-апаратної системи управління дроном для екологічного моніторингу територій, яка поєднує польотний контролер, навігаційні та екологічні сенсори, засоби телеметричного обміну даними та наземну станцію керування;

2 Розроблено імітаційну модель системи управління дроном у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє досліджувати процеси стабілізації польоту, навігації та збору даних екологічного моніторингу без використання реального безпілотного літального апарата;

3 Реалізовано підхід до інтеграції даних навігаційних та екологічних сенсорів у межах єдиної комп'ютерно-інтегрованої системи для моделювання процесів екологічного моніторингу територій;

4 Набули подальшого застосування методи імітаційного моделювання систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами для оцінювання ефективності алгоритмів стабілізації та виконання польотних завдань.

Відповідність спеціальності. Робота відповідає паспорту спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології», оскільки її зміст спрямований на розробку та дослідження системи автоматичного керування (САК) складним динамічним об’єктом. У роботі реалізовано повний цикл проектування автоматизованої системи: від математичного опису об’єкта керування до синтезу регуляторів, побудови імітаційної моделі та аналізу якості перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink. У межах дослідження розглядаються питання збору, передачі, обробки та інтелектуального аналізу даних у системах Industrial IoT, що є складовою сучасних комп’ютерно-інтегрованих систем.

Практичне значення роботи полягає у створенні універсальної імітаційної моделі системи управління дроном, яка може бути використана як

база для реальних автоматизованих комплексів екологічного моніторингу. Основні результати можуть бути застосовані у таких напрямках:

Для екологічних служб та організацій: розроблена система дозволяє автоматизувати процес збору даних про стан атмосферного повітря у важкодоступних місцях, знижуючи ризики для персоналу та зменшуючи витрати на проведення моніторингу.

У процесі проектування БПЛА: створена модель у MATLAB/Simulink дозволяє інженерам проводити віртуальне налаштування ПІД-регуляторів та тестування нових алгоритмів навігації без ризику втрати дороговартісного обладнання (етап Software-in-the-Loop).

В освітньому процесі: матеріали роботи, зокрема розроблена структурна схема та налаштована модель САК, можуть бути використані як методичне забезпечення при вивченні дисциплін «Теорія автоматичного керування», «Мікропроцесорні системи» та «Моделювання об'єктів автоматизації» для студентів спеціальності 151.

Комп'ютерно-інтегрований аспект: запропонований підхід до обробки даних та фільтрації сигналів сенсорів може бути інтегрований у бортове програмне забезпечення різних типів безпілотних платформ.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану використання БПЛА в екологічному моніторингу, розглянуто існуючі архітектури систем управління та обґрунтовано вибір засобів моделювання.

Другий розділ присвячено аналізу апаратного забезпечення системи, вибору сенсорів та розробці математичної моделі динаміки дрона.

У третьому розділі розроблено архітектуру імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink та синтезовано алгоритми керування на основі ПІД-регуляторів.

Четвертий розділ містить опис програмної реалізації моделі, результати проведених експериментів та аналіз стійкості системи при виконанні місій моніторингу.

РОЗДІЛ 1.
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ БПЛА ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АРХІТЕКТУР СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

1.1 Роль БПЛА в автоматизованих системах екологічного моніторингу

Аналіз сучасних наукових досліджень показує, що використання безпілотних літальних апаратів є одним із найбільш перспективних напрямів автоматизації процесів екологічного моніторингу. Порівняно зі стаціонарними вимірювальними постами БПЛА забезпечують значно більшу мобільність, можливість оперативного охоплення значних територій та проведення вимірювань у важкодоступних місцях. Крім того, використання дронів дозволяє зменшити витрати на проведення моніторингових робіт та підвищити оперативність отримання інформації про стан навколишнього середовища [1–6].

Основні сфери використання БПЛА:

- **Agricultural (Сільське господарство):** Дрони здійснюють високоточне внесення добрив та засобів захисту рослин, моніторять стан посівів за допомогою мультиспектральних камер та оцінюють вологість ґрунту, що суттєво оптимізує витрати та підвищує врожайність.
- **Infrastructure (Моніторинг інфраструктури):** Безпілотники проводять безпечну інспекцію важкодоступних об'єктів (мостів, вітрогенераторів, ЛЕП, трубопроводів). Вони виявляють тріщини, корозію та інші дефекти, дозволяючи проводити ремонти до виникнення аварій.
- **Rescue (Пошуково-рятувальні операції):** Завдяки тепловізорам та камерам високої роздільної здатності, дрони допомагають швидко знаходити зниклих людей у горах, лісах чи на воді, а також оцінювати масштаб стихійного лиха (повеней, пожеж) без ризику для рятувальників.
- **Military (Військова справа):** БПЛА виконують ключові функції на полі бою: розвідку та коригування артилерії, патрулювання територій, логістичні завдання (доставка медикаментів чи боєприпасів), а також діють як високоточні ударні засоби.

Для задач екологічного моніторингу БПЛА інтегруються зі спеціалізованими модулями, що включають газоаналізатори (детектори CO, NO_2, SO_2), датчики дрібнодисперсного пилу (PM2.5, PM10), термокамери та мультиспектральні сенсори для аналізу стану рослинності [3]–[6].

Основними перевагами застосування БПЛА в екологічних задачах є:

- **Висока маневреність:** можливість проведення замірів у безпосередній близькості до джерел забруднення (димові труби, зони стихійних сміттєзвалищ).
- **Масштабованість:** дрони дозволяють створювати 3D-карти розподілу забруднюючих речовин в атмосфері на різних висотах.
- **Автономність:** сучасні програмно-апаратні системи управління дозволяють мінімізувати участь оператора, виконуючи польоти за заздалегідь запрограмованими алгоритмами.



Рисунок 1.1– Класифікація безпілотних літальних апаратів.

Для забезпечення комплексної оцінки стану екосистем, сучасні БПЛА розглядаються як мобільні інтелектуальні сенсорні мережі (див.рис.1.1). На

відміну від статичних датчиків, дрон здатний виконувати адаптивне сканування: при виявленні перевищення концентрації шкідливих речовин у певній точці, алгоритм управління може автоматично коригувати маршрут для детальнішого обстеження зони забруднення [17].

Класифікація Безпілотних Літальних Апаратів (БПЛА)

Мультироторні БПЛА

Характеристики: Вертикальний зліт і посадка (VTOL).

– Висока маневреність.

– Обмежений час польоту.

Приклади: Квадрокоптер, октокоптер.

Літакового типу БПЛА

Характеристики: Горизонтальний зліт і посадка (потрібна злітна смуга або пускова установка/катапульта)

– Висока швидкість і дальність польоту.

– Більша вантажопідйомність.

Приклади: Літак-розвідник.

Гібридні БПЛА

Характеристики: Поєднують переваги VTOL (вертикальний зліт) з дальністю літаків (fixed-wing).

– Гнучкість використання.

– Складніша система керування.

Приклади: Гібридний дрон.

VTOL — Вертикальний Зліт та Посадка

– Tilt-Rotor / Tilt-Wing (поворотні гвинти/крила).

– Tail-Sitter (апарати, що злітають «на хвості», а потім переходять у горизонтальний політ).

Характеристики: Вертикальний зліт без злітної смуги.

– Можливість переходу в горизонтальний політ.

– Спеціалізовані конструкції.

Приклади: Bell V-247 (tilt-rotor), Northrop Grumman MQ-8 (helicopter).

Основними технічними параметрами, що визначають ефективність системи екологічного моніторингу на базі БПЛА, є:

- *Вантажопідйомність (Payload):* визначає кількість та складність встановленого обладнання (наприклад, поєднання спектрометра та лідара).
- *Енергоефективність:* тривалість польоту безпосередньо впливає на площу покриття території за один цикл моніторингу.
- *Електромагнітна сумісність:* оскільки робота потужних двигунів дрона створює завади для високочутливих екологічних сенсорів, що потребує впровадження фільтрації сигналів.

Таблиця 1.1

Порівняння типів БПЛА

Тип	Час польоту	Маневреність	Вертикальний зліт
Квадрокоптер	Висока	Висока	Так
Літакового типу	Дуже висока	Низька	Ні
VTOL	Висока	Середня	Так

1.2 Аналіз принципів побудови систем управління дронами

Система управління дроном є складним комплексом, що працює в режимі реального часу. З точки зору теорії автоматичного керування, дрон як об'єкт управління характеризується високим ступенем нелінійності, взаємозв'язком каналів керування та нестабільністю у відкритому стані.

Типова структура програмно-апаратної системи управління включає:

1. **Внутрішній контур (стабілізація):** забезпечує підтримку заданих кутів орієнтації (крен, тангаж, рискання) за допомогою даних від інерціальних датчиків (IMU).
2. **Зовнішній контур (навігація):** відповідає за утримання позиції за координатами X, Y, Z, використовуючи дані GPS/ГЛОНАСС та барометричних висотомірів.
3. **Інформаційний рівень:** збір та передача даних екологічного стану до наземної станції керування.

Для реалізації таких систем найчастіше використовуються мультироторні схеми (квадрокоптери), оскільки вони здатні до зависання в одній точці, що критично важливо для точного відбору проб повітря або тривалого спостереження за об’єктом.

Система управління сучасним дроном базується на ієрархічному принципі. З точки зору автоматизації, ми виділяємо три рівні керування:

1. **Low-level control (Низький рівень):** Пряме керування кутовими швидкостями двигунів. Тут реалізуються швидкі контури зворотного зв'язку (100-400 Гц), що забезпечують стабільність апарата.
2. **Mid-level control (Середній рівень):** Утримання заданої висоти та курсу. Використовуються каскадні системи регулювання, де зовнішній контур (позиція) формує завдання для внутрішнього (кути нахилу).
3. **High-level control (Високий рівень):** Планування траєкторії та обхід перешкод. На цьому рівні інтегруються комп’ютерно-інтегровані алгоритми обробки даних екологічного стану для прийняття рішень щодо подальшого руху.

Таблиця 1.2

Порівняння польотних контролерів

Контролер	Відкрита архітектура	MAVLink	MATLAB
Pixhawk	Так	Так	Так
Cube Orange	Так	Так	Так
DJI A3	Частково	Ні	Обмежено

Серед сучасних польотних контролерів найбільшого поширення набули рішення сімейств Pixhawk, CubePilot та DJI A3. Порівняльний аналіз (див. табл.1.2) показує, що платформа Pixhawk забезпечує оптимальне співвідношення між функціональними можливостями, відкритістю програмного забезпечення та підтримкою протоколів обміну даними. Важливою перевагою є підтримка відкритого програмного забезпечення ArduPilot та MAVLink, що дозволяє

інтегрувати систему з середовищами моделювання MATLAB/Simulink, Gazebo та наземними станціями керування [7], [11], [12].

1.3 Огляд середовищ імітаційного моделювання та обґрунтування вибору MATLAB/Simulink

Для дослідження алгоритмів керування безпілотним літальним апаратом доцільним є використання середовища MATLAB/Simulink, яке містить спеціалізовані інструменти для моделювання систем автоматичного керування та динаміки польоту. На відміну від Gazebo або AirSim, дане середовище забезпечує зручні засоби синтезу регуляторів, аналізу перехідних процесів та побудови математичних моделей об'єктів керування. Це дозволяє проводити комплексне дослідження системи ще до створення фізичного прототипу [7], [8].

У процесі розробки систем управління (САК) етап імітаційного моделювання є критичним. Основними програмними інструментами в даній галузі є ROS/Gazebo, AirSim та MATLAB/Simulink [7], [8].

Таблиця 1.3.

Порівняльний аналіз середовищ моделювання

Критерій	MATLAB	Gazebo	AirSim
САК	+	-	-
MAVLink	+	+	+
Аналіз перехідних процесів	+	-	-
Простота налаштування	+	-	+

Порівняльний аналіз (див. табл. 1.3) показує, що для цілей автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій **MATLAB/Simulink** має ряд суттєвих переваг:

- **Блочно-ієрархічний підхід:** дозволяє наочно представити САК у вигляді передавальних функцій та логічних блоків.
- **Інструментарій Control System Toolbox:** надає потужні засоби для аналізу стійкості, побудови кореневих годографів та автоматичного налаштування ПІД-регуляторів.

- **UAV Toolbox:** спеціалізована бібліотека, що містить готові блоки динаміки польоту, моделей атмосфери та сенсорів, що значно прискорює створення імітаційної моделі.
- **Можливість генерації коду:** розроблена в Simulink модель може бути автоматично конвертована в C/C++ код для прошивки реальних мікроконтролерів (наприклад, STM32), що повністю відповідає концепції комп'ютерно-інтегрованих технологій.

1.4 Аналіз протоколів обміну даними та телеметрії в системах управління БПЛА

Ефективне функціонування сучасних безпілотних літальних апаратів неможливе без надійного обміну даними між бортовими компонентами, навігаційними сенсорами, польотним контролером та наземною станцією керування. Система телеметрії забезпечує передачу інформації про стан дрона, параметри польоту та результати вимірювань у режимі реального часу, що є важливою складовою автоматизованих систем екологічного моніторингу.

Одним із найбільш поширених протоколів обміну даними в сучасних БПЛА є MAVLink (Micro Air Vehicle Link). MAVLink являє собою легкий двонапрямний протокол передачі повідомлень, спеціально розроблений для безпілотних систем. Протокол забезпечує передачу телеметричної інформації, координат GPS, даних сенсорів, параметрів польоту, команд керування та службових повідомлень між польотним контролером і наземною станцією керування. Основними перевагами MAVLink є відкритість специфікації, низькі вимоги до пропускної здатності каналу зв'язку та підтримка більшістю сучасних платформ керування БПЛА [11], [12].

Для фізичної передачі даних між окремими компонентами системи широко використовується інтерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Даний інтерфейс застосовується для підключення GPS-модулів, телеметричних радіомодемів, компасів та інших периферійних пристроїв до польотного контролера. Простота реалізації та висока надійність зробили UART

фактичним стандартом внутрішньої комунікації в більшості платформ сімейства Pixhawk.

На етапі налаштування та тестування системи активно використовується інтерфейс USB. Через USB-з'єднання здійснюється завантаження програмного забезпечення польотного контролера, конфігурація параметрів системи, запис журналів польоту та обмін телеметричною інформацією між контролером і персональним комп'ютером. Використання USB значно спрощує процес налагодження та інтеграції програмно-апаратного комплексу.

Для передачі даних на значні відстані застосовуються спеціалізовані телеметричні радіомодулі (Telemetry Radio). Найбільш поширеними є модулі діапазонів 433 МГц, 868 МГц та 915 МГц, які забезпечують двосторонній обмін телеметричними даними між дроном та наземною станцією керування. Використання таких рішень дозволяє отримувати інформацію про координати, висоту, швидкість, заряд акумулятора та показники бортових сенсорів навіть на значній відстані від оператора.

Альтернативним способом організації бездротового зв'язку є використання технології Wi-Fi. Перевагою Wi-Fi є висока швидкість передачі даних, що особливо важливо при передаванні фото-, відеоінформації та результатів роботи екологічних сенсорів. Проте радіус дії Wi-Fi суттєво менший порівняно зі спеціалізованими телеметричними системами, тому його застосування доцільне переважно для локальних випробувань або роботи на невеликих відстанях.

Для моніторингу польоту та взаємодії з дроном широко використовується програмний комплекс Mission Planner. Дане програмне забезпечення виконує функції наземної станції керування та забезпечує налаштування польотного контролера, планування маршрутів польоту, відображення телеметричних даних, контроль параметрів навігації та аналіз журналів польоту. Завдяки підтримці протоколу MAVLink Mission Planner може взаємодіяти з платформами ArduPilot і Pixhawk, що робить його одним із найбільш популярних інструментів для розробки та тестування безпілотних систем [11], [12].

Таким чином, аналіз сучасних засобів телеметрії показав, що для реалізації програмно-апаратної системи управління дроном доцільно використовувати

архітектуру на базі польотного контролера Pixhawk із підтримкою MAVLink, інтерфейсів UART та USB, телеметричного радіоканалу для передачі даних і наземної станції Mission Planner. Такий підхід забезпечує надійний обмін інформацією між усіма компонентами системи та створює основу для побудови комп'ютерно-інтегрованої системи екологічного моніторингу територій.

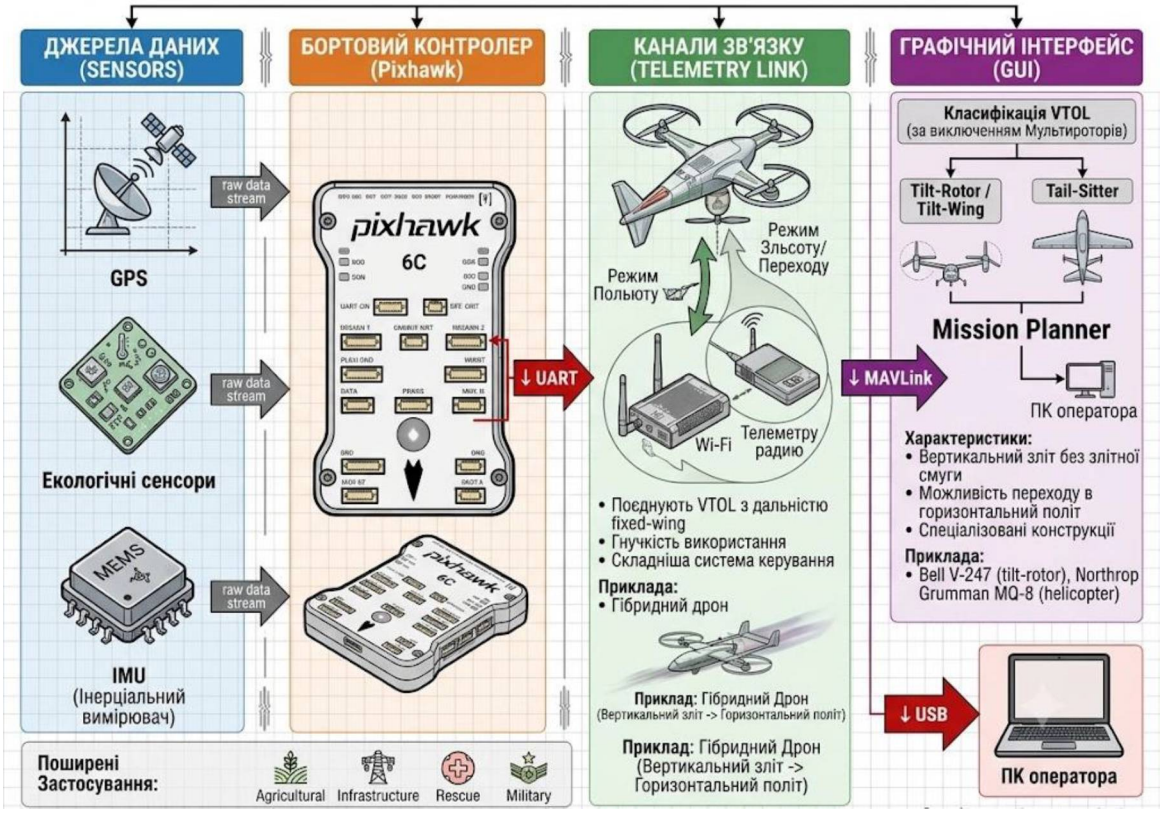


Рисунок 1.2 – Структура телеметричного обміну даними в системі управління БПЛА

Таблиця 1.4.

Порівняння каналів передачі даних у БПЛА

Технологія	Дальність	Швидкість	Основне призначення
UART	до декількох метрів	середня	внутрішні підключення
USB	до 5 м	висока	налаштування і тестування
Wi-Fi	до 100–300 м	висока	передача даних і відео
Telemetry Radio	до декількох км	середня	телеметрія
MAVLink	залежить від каналу	висока ефективність	логічний протокол обміну

1.5 Постановка задачі дослідження.

На основі проведеного аналізу, основною задачею бакалаврської роботи є створення комплексної імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink, яка повинна включати:

1. Математичну модель динаміки польоту з врахуванням аеродинамічних сил.
2. Систему автоматичного керування для стабілізації та навігації.
3. Блок імітації роботи екологічних сенсорів.
4. Інтерфейс візуалізації результатів для оцінки якості виконання місії.

Висновок до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз сучасних підходів до використання безпілотних літальних апаратів у задачах екологічного моніторингу територій. За результатами дослідження сформульовано такі висновки:

1. Встановлено, що використання БПЛА дозволяє підвищити оперативність та ефективність екологічного моніторингу завдяки можливості виконання вимірювань у важкодоступних районах і отримання даних у режимі реального часу.

2. Проаналізовано архітектури сучасних систем управління безпілотними літальними апаратами та визначено, що найбільш ефективною для задач моніторингу є ієрархічна структура, яка включає контури стабілізації, навігації та планування місії.

3. Проведено порівняльний аналіз типів БПЛА та обґрунтовано вибір квадрокоптера як платформи для реалізації системи завдяки можливості вертикального зльоту і посадки, зависання та високій маневреності.

4. Обґрунтовано доцільність використання польотного контролера Pixhawk із програмним забезпеченням ArduPilot як основи програмно-апаратної системи управління.

5. Визначено переваги середовища MATLAB/Simulink, UAV Toolbox та Control System Toolbox для розробки математичної та імітаційної моделей системи автоматичного керування дроном.

6. Встановлено, що для організації телеметричного обміну доцільно використовувати протокол MAVLink у поєднанні з інтерфейсами UART, USB та телеметричними радіоканалами, а як наземну станцію керування – Mission Planner.

Отримані результати стали основою для вибору архітектури програмно-апаратної системи, розробки математичної моделі квадрокоптера та подальшого синтезу алгоритмів керування, що розглядаються у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2.
ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

2.1 Формування вимог до програмно-апаратної системи екологічного моніторингу

Функціональні вимоги

- автоматичний зліт;
- автоматична посадка;
- рух за маршрутом;
- збір екологічних даних;
- передача телеметрії;
- збереження журналів польоту.

Технічні вимоги

- похибка GPS не більше 3–5 м;
- частота передачі телеметрії не менше 1 Гц;
- автономність не менше 20 хв;
- дальність зв'язку не менше 1 км.

Таблиця 2.1

Вимоги до системи екологічного моніторингу

Параметр	Значення
Час польоту	≥20 хв
Дальність	≥1 км
GPS	≤5 м
Телеметрія	≥1 Гц
Висота польоту	до 120 м

Для систематизації вимог до розроблюваної програмно-апаратної системи виконано їх класифікацію за основними групами параметрів. Результати узагальнення наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Узагальнені вимоги до системи

Група вимог	Параметр	Значення
Навігаційні	Похибка позиціонування	≤5 м
Телеметрія	Частота передачі	≥1 Гц
Автономність	Час польоту	≥20 хв
Моніторинг	Частота вимірювань	≥1 вимір/с
Надійність	Втрата пакетів	≤5%

Як видно з табл. 2.2, найбільш критичними параметрами для системи екологічного моніторингу є точність позиціонування, тривалість автономної роботи та надійність передачі телеметричних даних. Саме ці характеристики були використані як критерії під час вибору апаратних засобів системи [9], [10].

2.2 Розробка структури комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу

Програмно-апаратна система екологічного моніторингу побудована відповідно до принципів комп'ютерно-інтегрованих технологій та складається з трьох рівнів: рівня збору даних, рівня керування та рівня візуалізації.

Нижній рівень представлений сенсорною підсистемою, що включає датчики концентрації газів, пилу та навігаційні модулі.

Середній рівень реалізовано на базі польотного контролера Pixhawk, який здійснює збір даних, первинну обробку інформації, виконання алгоритмів керування та формування телеметричних повідомлень.

Верхній рівень представлений наземною станцією Mission Planner, яка забезпечує моніторинг параметрів польоту, налаштування системи та збереження результатів вимірювань.

Загальна структура комп'ютерно-інтегрованої системи екологічного моніторингу наведена на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Логічна структура підключення Pixhawk.

З рисунка 2.1 видно, що центральним елементом системи виступає польотний контролер Pixhawk, який здійснює інтеграцію навігаційних, екологічних та телеметричних підсистем. Така структура відповідає принципам комп'ютерно-інтегрованих технологій та забезпечує централізовану обробку даних [7], [12], [13], [14] .

2.3 Обґрунтування вибору польотного контролера та бортового обладнання

Для реалізації системи було проаналізовано контролери Pixhawk 6C, Cube Orange та DJI A3 (див. табл.2.2). Порівняння показало, що Pixhawk забезпечує необхідну кількість UART-портів для підключення GPS-модуля, телеметричного радіомодема та екологічних сенсорів при меншій вартості та відкритій архітектурі.

Для вибору апаратної платформи проведено порівняльний аналіз сучасних польотних контролерів, результати якого наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Характеристика	Pixhawk 6C	Cube Orange	DJI A3
MAVLink	+	+	-
ArduPilot	+	+	-
UART	6	5	2
Відкрита архітектура	+	+	-
Вартість	низька	висока	висока

З табл. 2.3 видно, що контролер Pixhawk 6C забезпечує найбільшу кількість комунікаційних інтерфейсів та підтримує відкриту екосистему ArduPilot. Це

дозволяє інтегрувати додаткові екологічні сенсори без модифікації апаратної архітектури [12], [16], [17].

Для побудови ефективної системи екологічного моніторингу необхідно обрати апаратну платформу, що забезпечить високу обчислювальну потужність для алгоритмів управління та стабільну роботу сенсорів.

1. *Польотний контролер:* В якості ядра системи обрано архітектуру на базі мікроконтролера STM32F4/F7 (платформа Pixhawk) (див. рис.2.2). Вибір зумовлений наявністю великої кількості UART/I2C портів для підключення екологічних датчиків та повною підтримкою пакету підтримки обладнання (Hardware Support Package) у MATLAB/Simulink.
2. *Сенсорна система моніторингу: Датчик концентрації газів (наприклад, серія MQ або Sensirion):* для детектування CO_2 та NO_x.
    - *Лазерний датчик пилу (наприклад, SDS011):* для вимірювання часток PM2.5 та PM10.
3. *Навігаційний модуль:* GPS/Glonass модуль з інтегрованим магнітометром для точного дотримання маршруту в автоматичному режимі (див. рис.2.3).



Рисунок 2.2 – Політний контролер Pixhawk.



Рисунок 2.3 – Нвігаційний модуль GPS.

2.4 Аналіз та вибір сенсорів екологічного моніторингу

При екологічному моніторингу ключовими факторами є:

- **Вітрове навантаження:** створює змінні моменти сил, що вимагає від ПІД-регуляторів швидкої реакції для стабілізації положення камер та датчиків.
- **Температура та вологість:** впливають на щільність повітря (що змінює підйомну силу гвинтів) та на точність показань хімічних сенсорів.
- **Рельєф місцевості:** потребує наявності ультразвукових або лазерних далекомірів (Lidar) у складі апаратної частини для підтримки постійної висоти над поверхнею при відборі проб.

Для визначення складу сенсорної підсистеми проведено порівняння найбільш поширених датчиків контролю газового середовища [25], [26], [27].

Таблиця 2.4

Порівняння сенсорів

Параметр	**MQ-135**	**SCD30**
CO_2	Так	Так
Точність	Низька	Висока
Цифровий вихід	Ні	Так
Вартість	Низька	Висока

Як видно з табл. 2.4, датчик SCD30 забезпечує значно вищу точність вимірювання концентрації CO_2, проте має вищу вартість. Для задач імітаційного моделювання доцільним є використання узагальненої моделі сенсора, параметри якої відповідають класу бюджетних газоаналізаторів.

Для контролю концентрації аерозольних частинок виконано аналіз датчиків пилу, результати якого наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5.

Сенсори пилу

Параметр	**SDS011**	**PMS7003**
PM2.5	Так	Так
PM10	Так	Так
UART	Так	Так
Точність	Середня	Висока

Порівняння показує, що обидва сенсори забезпечують вимірювання PM2.5 та PM10, однак PMS7003 характеризується вищою точністю та стабільністю показів. Для імітаційної моделі було обрано сенсори типу MQ-135 та SDS011 як найбільш доступні та достатні для дослідження принципів функціонування системи екологічного моніторингу.

2.5 Аналіз інформаційних потоків та каналів зв'язку

Інформаційний обмін у системі реалізовано за принципом багаторівневої телеметричної архітектури, де навігаційні та екологічні дані надходять до польотного контролера, обробляються та передаються оператору через MAVLink. Для оцінювання навантаження на телеметричну систему визначено основні інформаційні потоки між компонентами комплексу.

Таблиця 2.6

Основні інформаційні потоки між компонентами комплексу

Канал	**Дані**	**Частота**
GPS → Pixhawk	**Координати**	**5 Гц**
IMU → Pixhawk	**Прискорення**	**100 Гц**
Сенсор газу	**Концентрація**	**1 Гц**
Pixhawk → GCS	**Телеметрія**	**1–10 Гц**

З табл. 2.6 видно, що найбільшу інтенсивність формують навігаційні дані IMU, тоді як екологічні сенсори працюють із значно меншою частотою опитування. Це дозволяє реалізувати обмін інформацією без перевантаження каналу телеметрії [13], [16].

2.6 Формування функціональної структури системи

Функціональна схема розробленої системи відображає взаємодію між апаратними модулями та програмними алгоритмами. Вона включає:

1. **Блок первинної обробки:** зчитування сигналів з АЦП (від датчиків газу) та цифрових шин (IMU).
2. **Обчислювальний блок:** реалізація алгоритмів фільтрації (фільтр Калмана) та керування (ПІД-регулювання).
3. **Виконавчий блок:** ШІМ-контролери (ESC) для керування швидкістю безколекторних двигунів.

Для формалізації процесів функціонування програмно-апаратного комплексу виділено основні функціональні блоки системи.

Таблиця 2.7

Основні функціональні блоки системи

Блок	Функція
Сенсорний	Збір даних
Навігаційний	Визначення координат
Керуючий	Формування команд
Виконавчий	Управління двигунами
Телеметричний	Передача інформації

Представлена структура дозволяє розділити процес збору, обробки та передачі даних на окремі підсистеми, що спрощує подальше проектування алгоритмів керування та імітаційної моделі.

2.7. Математичний опис сигналів та методів їх обробки.

Для забезпечення високої якості управління в умовах реального польоту, дані, що надходять від сенсорів (екологічних та навігаційних), потребують попередньої математичної обробки. Це зумовлено наявністю високочастотних шумів від роботи двигунів та похибок вимірювання.

1. **Фільтрація сигналів екологічних сенсорів.** Сигнали від датчиків концентрації газів (наприклад, CO_2) мають значну інерційність та випадкові викиди. Для їх згладжування в роботі застосовується метод ковзного середнього (Moving Average Filter), що дозволяє отримати стабільний тренд концентрації забруднення:

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k], \quad (2.1)$$

де $x[n]$ – вхідний "сирий" сигнал, $y[n]$ – відфільтроване значення, M – вікно усереднення.

Формула (2.1) описує алгоритм ковзного усереднення, який використовується для зменшення випадкових шумів у сигналах екологічних датчиків. Зі збільшенням розміру вікна усереднення підвищується ступінь згладжування сигналу, однак збільшується інерційність системи.

Комплементарна фільтрація для орієнтації. Для визначення кутів нахилу дрона використовується об’єднання даних з акселерометра (стабільний у довгостроковій перспективі) та гіроскопа (точний у короткостроковій перспективі).

Формула комплементарного фільтра

$$\theta = \alpha(\theta_{prev} + \omega \Delta t) + (1-\alpha)\theta_{acc} \quad (2.2)$$

Формула (2.2) використовується для оцінювання кутів орієнтації БПЛА шляхом об'єднання даних акселерометра та гіроскопа. Такий підхід дозволяє зменшити вплив дрейфу гіроскопа та високочастотних вібрацій.

Це дозволяє усунути дрейф гіроскопа та чутливість акселерометра до вібрацій [28-33].

Нормалізація даних. Оскільки екологічні сенсори повертають значення у вольтах або цифрових одиницях, у цьому підрозділі описуються коефіцієнти перерахунку у фізичні величини (*ppm*, мг/м^3). Формула перерахунку концентрації

$$C = k \cdot U + b, \quad (2.3)$$

де:

- C— концентрація;
- U— виміряна напруга;
- k, b— коефіцієнти калібрування.

Отримані після перетворення значення концентрації використовуються як інформаційні сигнали комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу. Після нормалізації дані надходять до блоку обробки та телеметричного обміну, де здійснюється їх реєстрація, візуалізація та передача оператору. Таким чином, формула (2.3) забезпечує зв'язок між первинними вимірювальними сигналами сенсорів і цифровими даними, що використовуються в алгоритмах моніторингу навколишнього середовища.

Це необхідно для формування зворотного зв'язку в комп'ютерно-інтегрованій системі.

Висновки до розділу 2

На основі проведеного аналізу апаратного забезпечення та параметрів середовища можна зробити наступні висновки:

1. Обґрунтовано вибір апаратної платформи на базі контролера Pixhawk (STM32), що забезпечує необхідну обчислювальну потужність для реалізації складних алгоритмів керування в реальному часі та повну сумісність із середовищем моделювання.
2. Сформовано склад сенсорної підсистеми екологічного моніторингу, що включає датчики газоаналізу та пилу, а також навігаційні модулі, що дозволяє системі збирати комплексні дані про стан навколишнього середовища.
3. Виявлено основні зовнішні збурення (вітрове навантаження, температурні коливання), які впливають на стабільність САК, що враховано при подальшому проектуванні регуляторів.

4. Розроблено методику попередньої обробки та фільтрації сигналів, що забезпечує подачу "чистих" даних до контурів управління та підвищує загальну надійність імітаційної моделі.

Таким чином, застосування методів цифрової фільтрації, комплементарного об'єднання даних та калібрувального перетворення сигналів дозволяє підвищити достовірність інформації, що надходить від сенсорної підсистеми. Отримані математичні залежності використовуються при побудові імітаційної моделі та реалізації алгоритмів обробки даних у середовищі MATLAB/Simulink. Це забезпечує адекватне відтворення процесів функціонування програмно-апаратної системи екологічного моніторингу.

РОЗДІЛ 3.
РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРИ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

3.1 Математична модель динаміки дрона як об'єкта керування.

Для створення адекватної імітаційної моделі необхідно формалізувати фізику руху квадрокоптера. Дрон розглядається як тверде тіло з шістьма ступенями вільності. Математична модель базується на рівняннях Ньютона-Ейлера і враховує сили тяги двигунів, гравітацію та аеродинамічний опір.

Для побудови імітаційної моделі квадрокоптер розглядається як динамічна система з шістьма ступенями вільності, стан якої визначається координатами положення, лінійними швидкостями, кутами орієнтації та кутовими швидкостями. У загальному випадку вектор стану можна подати у вигляді:

$$X = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \varphi, \theta, \psi, p, q, r]^T,$$

де x, y, z – координати положення апарата у просторі; $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ – лінійні швидкості; φ, θ, ψ – кути крену, тангажу та рискання відповідно; p, q, r – кутові швидкості навколо відповідних осей.

Наведений вектор стану забезпечує повний опис динамічного стану безпілотного літального апарата та використовується під час побудови математичної моделі в середовищі MATLAB/Simulink.

Основними векторами стану системи є:

- Координати центра мас у просторі: $P = [x, y, z]^T$.
- Кути Ейлера (орієнтація): $\Phi = [\phi, \theta, \psi]^T$ (крен, тангаж, рискання).

Рівняння динаміки обертального руху описується як:

$$J\,\dot{\omega} + \omega \times (J\omega) = M$$

де J – матриця інерції, ω – кутова швидкість, M – керуючий момент, що створюється різницею тяги двигунів. У випадку дронів вони створюються асиметрією тяги та моментив протидії пропелерів.

Ці рівняння інтегруються в Simulink за допомогою блоку **6DOF (Euler Angles)**, що дозволяє обчислювати траєкторію польоту в реальному часі.

Таблиця 3.1

Основні параметри математичної моделі квадрокоптера

Параметр	Позначення	Значення
Маса	m	1,5 кг
Відстань до двигуна	l	0,25 м
Прискорення вільного падіння	g	9,81 м/с²
Момент інерції по осі X	J_x	0,02 кг·м²
Момент інерції по осі Y	J_y	0,02 кг·м²
Момент інерції по осі Z	J_z	0,04 кг·м²

Як видно з табл. 3.1, параметри моделі відповідають квадрокоптерам малого класу, які найчастіше використовуються для задач моніторингу навколишнього середовища. Зазначені параметри були використані під час побудови імітаційної моделі та налаштування системи керування.



Рисунок 3.1 – Структурна схема математичної моделі квадрокоптера.

З рисунка 3.1 видно, що формування руху квадрокоптера відбувається внаслідок перетворення керуючих сигналів у тягу двигунів та відповідні моменти сил. Результатом роботи моделі є координати положення та орієнтація апарата, які надалі використовуються підсистемою навігації та алгоритмами керування.

Імітаційна модель у MATLAB/Simulink побудована за модульним принципом, що відповідає сучасним стандартам комп'ютерно-інтегрованих технологій (рис. 3.2). Основні блоки моделі:

1. **Блок Mission Planner:** генерує цільові координати (waypoint) для обльоту території моніторингу.
2. **Контролер (Controller block):** містить ієрархічну систему регуляторів. Зовнішній цикл керує позицією (X, Y), а внутрішній – кутами нахилу.
3. **Модель силової установки (Plant):** імітує динаміку безколекторних двигунів та їхній вплив на корпус дрона.
4. **Блок Environmental Sensor:** програмна реалізація датчика екологічного стану, яка видає значення концентрації забруднення залежно від поточних координат дрона у віртуальному просторі.

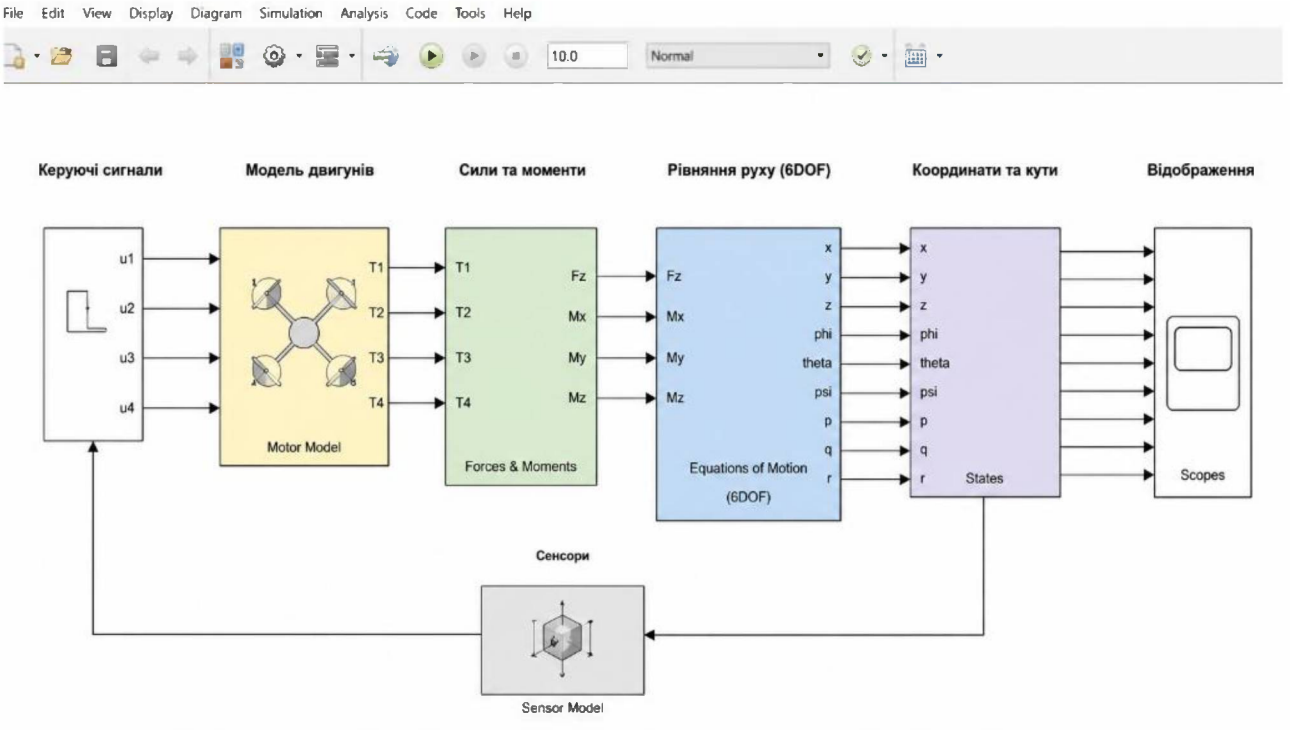


Рисунок 3.2 – Імітаційна модель у Simulink.

Теоретичною основою побудови математичної моделі стали класичні методи моделювання динамічних систем та безпілотних літальних апаратів [1, 2, 21–23].

3.2. Проектування структурної схеми САК у середовищі Simulink

3.2.1 Обґрунтування вибору алгоритму керування

Для забезпечення стабільного польоту безпілотного літального апарата необхідно реалізувати систему автоматичного керування, здатну компенсувати зовнішні збурення та підтримувати задані параметри руху. Серед сучасних методів керування БПЛА широко використовуються PID-регулятори, LQR-регулятори, адаптивні алгоритми та методи прогнозуючого керування (MPC).

Для даної роботи було обрано PID-регулювання, оскільки воно характеризується простотою реалізації, високою ефективністю для більшості польотних режимів та підтримується стандартними інструментами середовища MATLAB/Simulink. Крім того, PID-регулятори широко застосовуються у сучасних автопілотах ArduPilot та PX4 [12, 16, 21–23].

Для обґрунтування вибору алгоритму керування виконано порівняння найбільш поширених підходів.

Таблиця 3.2

Порівняння алгоритмів керування БПЛА

Метод	Переваги	Недоліки
PID	Простота реалізації	Потребує налаштування
LQR	Висока якість керування	Складність математичної моделі
MPC	Прогнозування поведінки	Великі обчислювальні витрати
Fuzzy Logic	Робота з невизначеністю	Складність налаштування

Результати порівняльного аналізу, наведені в таблиці 3.2, свідчать про те, що PID-регулятори забезпечують найкраще співвідношення між складністю реалізації та якістю керування, що робить їх доцільними для використання в системах екологічного моніторингу на базі БПЛА.

3.2.2 Структура системи керування

Для стабілізації положення квадрокоптера використовується каскадна структура автоматичного керування. Внутрішній контур відповідає за стабілізацію кутів орієнтації, а зовнішній – за підтримання координат польоту.

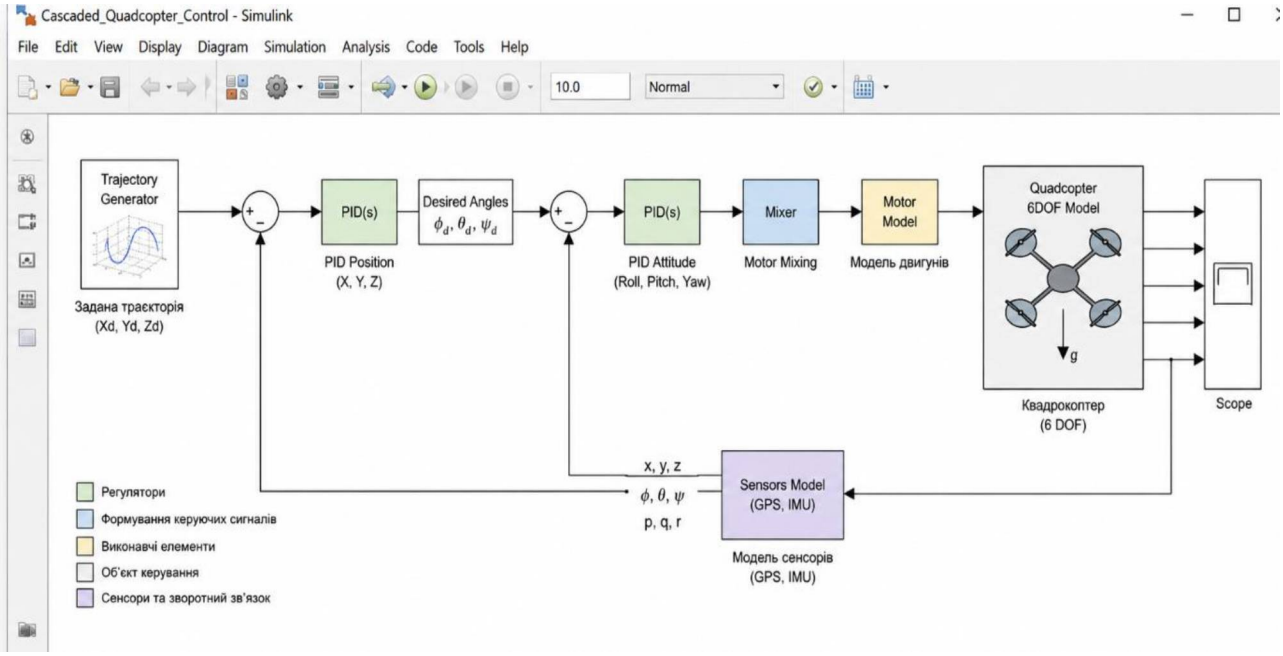


Рисунок 3.3 – Структура каскадної системи автоматичного керування квадрокоптером.

З рисунка 3.3 видно, що система керування побудована за каскадним принципом. Зовнішній контур забезпечує позиціонування квадрокоптера за координатами, формуючи необхідні кути орієнтації. Внутрішній контур виконує стабілізацію кутів крену, тангажу та рискання, забезпечуючи стійкість польоту. Інформація про поточний стан апарата надходить від навігаційних та інерціальних сенсорів через канал зворотного зв'язку.

Каскадна структура дозволяє розділити задачі позиціонування та стабілізації. Це підвищує стійкість системи та спрощує процес налаштування регуляторів (див. рис.3.4.)

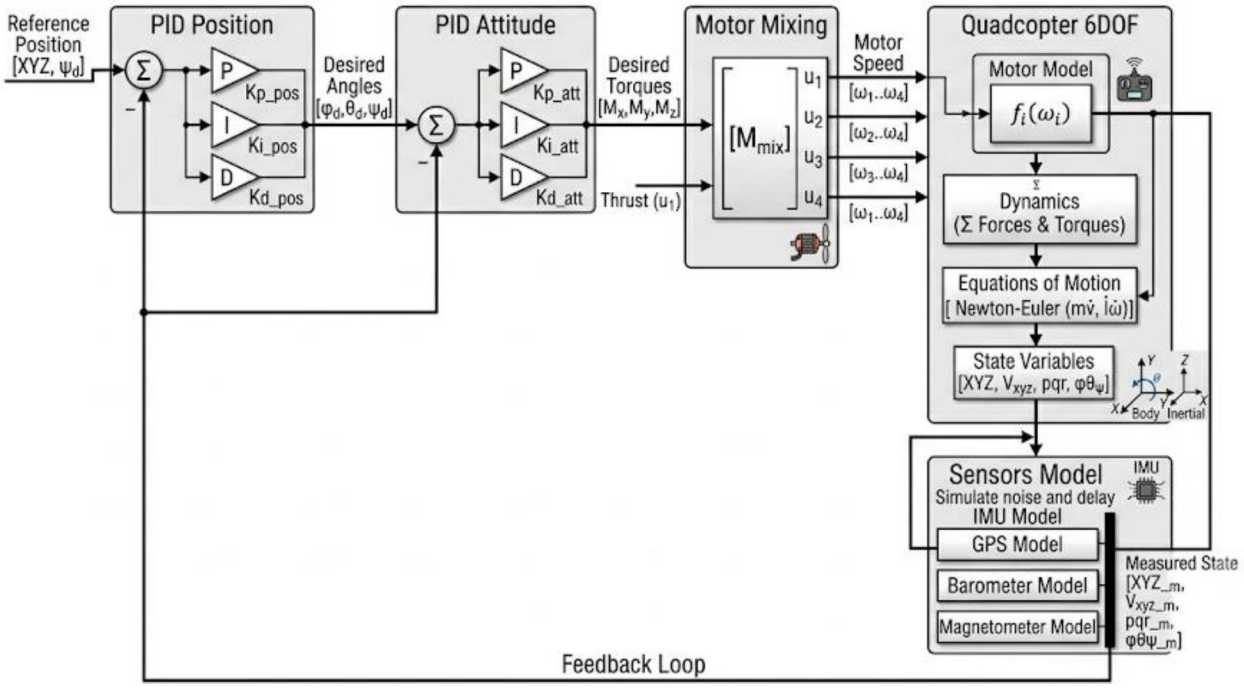


Рисунок 3.4 — Структура каскадної системи автоматичного керування квадрокоптером у MATLAB/Simulink.

3.2.3 Математична модель PID-регулятора

У загальному випадку керуючий сигнал PID-регулятора формується на основі поточної похибки керування.

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\int e(t)dt+K_d*de(t)/dt$$

де:

- u(t)– керуючий сигнал;
- e(t)– похибка регулювання;
- K_p– коефіцієнт пропорційної складової;
- K_i– коефіцієнт інтегральної складової;
- Kd – коефіцієнт диференціальної складової

Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію на зміну похибки, інтегральна усуває статичну похибку, а диференціальна підвищує демпфування системи та зменшує перерегулювання.

3.2.4 Синтез та налаштування ПІД-регуляторів системи управління

Налаштування параметрів PID-регуляторів виконувалось із використанням інструмента MATLAB PID Tuner.

Таблиця 3.3

Параметри PID-регуляторів

Канал	Kp	Ki	Kd
Roll	2,5	0,8	0,12
Pitch	2,5	0,8	0,12
Yaw	1,8	0,4	0,08
Altitude	3,2	1,1	0,15

Отримані параметри забезпечили компроміс між швидкодією та стійкістю системи. Під час налаштування особлива увага приділялась мінімізації перерегулювання та скороченню часу перехідного процесу [8], [33].

Для стабілізації польоту в роботі застосовано класичні ПІД-регулятори (Пропорційно-Інтегрально-Диференціальні). Налаштування коефіцієнтів (**Kp**, **Ki**, **Kd**) проводилося методом послідовних наближень та за допомогою інструменту **PID Tuner** у MATLAB.

- **P-ланка:** забезпечує швидкість реакції на відхилення від заданого курсу.
- **I-ланка:** усуває статичну похибку, що важливо при дії постійного вітру.
- **D-ланка:** демпфує коливання, забезпечуючи плавність польоту, що критично для отримання чітких даних з датчиків моніторингу.

В результаті синтезу було отримано параметри регуляторів, які забезпечують стійкість системи при відхиленнях кутів до 30 градусів та поривах вітру до 5 м/с.

3.3 Алгоритм функціонування програмно-апаратної системи управління дроном.

Після побудови математичної моделі квадрокоптера та проектування системи автоматичного керування необхідно формалізувати загальний алгоритм роботи програмно-апаратної системи під час виконання місії екологічного моніторингу. Такий алгоритм визначає послідовність обробки інформації, взаємодію між окремими підсистемами та порядок формування керуючих впливів.

На початковому етапі здійснюється ініціалізація апаратної частини системи. Польотний контролер Pixhawk виконує перевірку працездатності

основних компонентів, встановлює зв'язок із GPS-модулем, інерціальним вимірювальним блоком IMU, барометром, магнітометром та екологічними сенсорами, що використовуються для вимірювання параметрів навколишнього середовища.

Після завершення ініціалізації система переходить у режим отримання навігаційних даних. На цьому етапі здійснюється визначення поточних координат дрона, оцінювання його орієнтації у просторі та перевірка готовності до виконання польотної місії. Паралельно наземна станція Mission Planner передає маршрут польоту у вигляді набору координатних точок (waypoints).

Після старту безпілотного літального апарата активується система автоматичного керування. На основі даних, що надходять від акселерометра, гіроскопа та GPS-модуля, виконується розрахунок поточного положення апарата відносно заданої траєкторії. Система PID-регулювання формує керуючі сигнали, які передаються на електронні регулятори швидкості ESC та безколекторні двигуни квадрокоптера.

Під час руху за маршрутом одночасно виконується збір екологічних даних. Сенсорна підсистема фіксує значення температури, вологості, концентрації газів, рівня запиленості або інших параметрів, залежно від конфігурації корисного навантаження. Отримана інформація прив'язується до поточних GPS-координат та передається через телеметричний канал зв'язку.

Передача інформації між дроном і наземною станцією реалізується за допомогою протоколу MAVLink через телеметричний радіоканал або Wi-Fi з'єднання. Mission Planner виконує відображення параметрів польоту в режимі реального часу, зберігає телеметричні журнали та дозволяє оператору контролювати перебіг виконання місії.

Після завершення проходження маршруту система виконує автоматичне завершення місії та посадку. Усі зібрані телеметричні й екологічні дані зберігаються для подальшого аналізу результатів моніторингу.

Таким чином, запропонований алгоритм (див. рис. 3.5) забезпечує узгоджену роботу апаратної та програмної частин системи, реалізує автоматичне

керування польотом, збір екологічних даних і телеметричний обмін у межах єдиної комп’ютерно-інтегрованої системи.

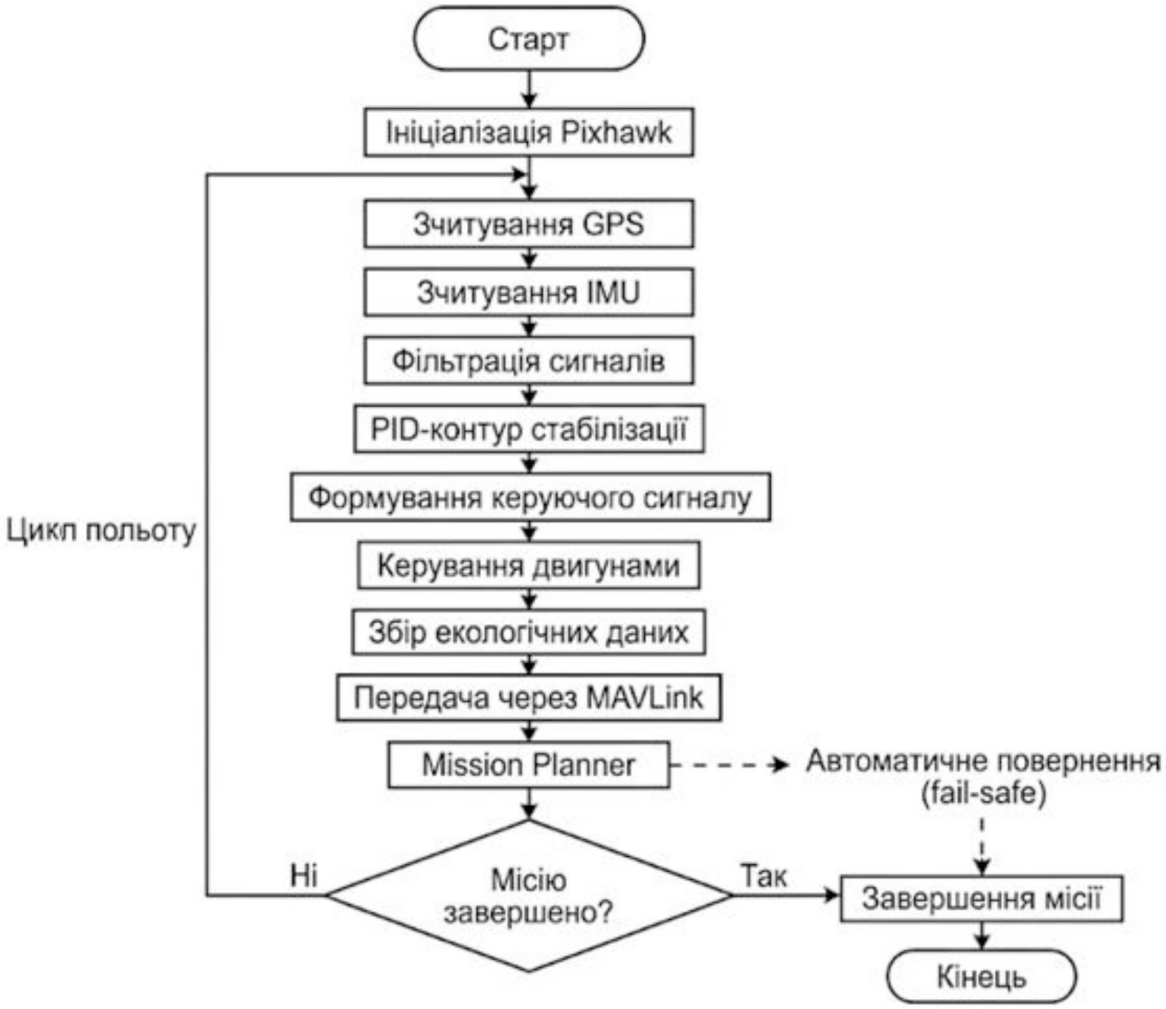


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму функціонування комплексної системи автоматичного управління безпілотним апаратом.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено математичну модель динаміки квадрокоптера, яка враховує взаємозв'язок між векторами сил та кутовими швидкостями, що стало основою для побудови цифрового двійника системи.
2. Спроектовано архітектуру імітаційної моделі в MATLAB/Simulink, яка об'єднує контури керування, фізику польоту та віртуальні екологічні сенсори в єдину комп'ютерно-інтегровану систему.

3. Проведено синтез та налаштування каскадних ПІД-регуляторів, що дозволило досягти стабільного утримання заданої траєкторії польоту з мінімальною динамічною похибкою.
4. Створена модель дозволяє проводити тестування різних сценаріїв екологічного моніторингу без ризику пошкодження реального обладнання.
5. Розроблено алгоритм функціонування програмно-апаратної системи управління дроном, який описує послідовність виконання польотної місії, обробку навігаційної інформації, роботу системи автоматичного керування та передачу телеметричних даних до наземної станції.

У підрозділі розроблено систему автоматичного керування квадрокоптером на основі каскадної структури PID-регуляторів. Виконано обґрунтування вибору алгоритму керування, сформовано структуру контурів регулювання та визначено параметри регуляторів за допомогою інструментів MATLAB. Отримані результати стали основою для побудови імітаційної моделі та проведення подальших досліджень ефективності системи керування.

РОЗДІЛ 4
ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

4.1. Опис програмного середовища та конфігурація моделі

Програмна реалізація системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом виконана у середовищі MATLAB R2024b із використанням пакетів Simulink, UAV Toolbox та Control System Toolbox. Вибір даного програмного середовища обумовлений широкими можливостями моделювання динамічних систем, синтезу регуляторів та дослідження перехідних процесів у складних багатоконтурних системах керування.

Розроблювана програмно-апаратна система управління безпілотним літальним апаратом повинна забезпечувати ефективне виконання задач екологічного моніторингу територій при дотриманні встановлених технічних та експлуатаційних показників.

Система повинна забезпечувати стабільний автономний політ безпілотного літального апарата тривалістю не менше 20 хвилин без втрати керованості та збереження стабільності параметрів польоту. Похибка позиціювання під час проходження заданого маршруту не повинна перевищувати 1 метра, що дозволяє виконувати точний контроль визначених ділянок місцевості.

Час реакції системи автоматичного керування на зміну керуючого сигналу повинен відповідати вимогам швидкодії та забезпечувати стабілізацію літального апарата у межах не більше 2 секунд. Величина перерегулювання у перехідних процесах не повинна перевищувати 5 %, що гарантує стійкість роботи системи під час виконання польотної місії.

Система телеметричного зв’язку повинна забезпечувати передачу інформації між безпілотним літальним апаратом та наземною станцією керування з частотою не менше 5 Гц у режимі реального часу без критичної втрати пакетів даних.

Розроблена система повинна мати можливість інтеграції додаткових сенсорних модулів екологічного контролю без суттєвого збільшення апаратної

складності, що забезпечує масштабованість та можливість подальшого практичного використання у автоматизованих системах моніторингу навколишнього середовища.

Застосування програмного моделювання дозволяє зменшити витрати на етапі проектування, тестування та налагодження системи, що підвищує економічну ефективність розробки у порівнянні з безпосереднім створенням фізичного експериментального зразка на початковому етапі проєктування.

Розроблена імітаційна модель реалізована за модульним принципом та складається з декількох функціональних блоків: модуля генерації маршруту польоту, математичної моделі квадрокоптера, системи PID-регулювання, блоку моделювання зовнішніх збурень, віртуального екологічного сенсора та підсистеми телеметричного обміну (див. рис. 4.1).

Для проведення моделювання були встановлені наступні параметри системи:

- час дискретизації контуру стабілізації – 0.001 с;
- час дискретизації навігаційного контуру – 0.01 с;
- метод чисельного інтегрування ODE4 (Runge-Kutta);
- тривалість однієї місії моделювання – 300 с;
- висота польоту – 10 м;
- площа контрольованої території – 100×100 м.

Наведені технічні характеристики визначають основні параметри функціонування програмно-апаратної системи управління дроном та формують вимоги до її практичного застосування. Встановлені показники автономності, точності навігації та стабільності телеметричного обміну забезпечують можливість ефективного виконання задач екологічного моніторингу територій у межах заданих технічних обмежень.

Для підвищення достовірності моделювання у систему додатково введено зовнішні збурення, що імітують вплив поривів вітру та випадкові похибки сенсорів. Такий підхід дозволяє наблизити результати моделювання до реальних умов експлуатації безпілотного літального апарата.

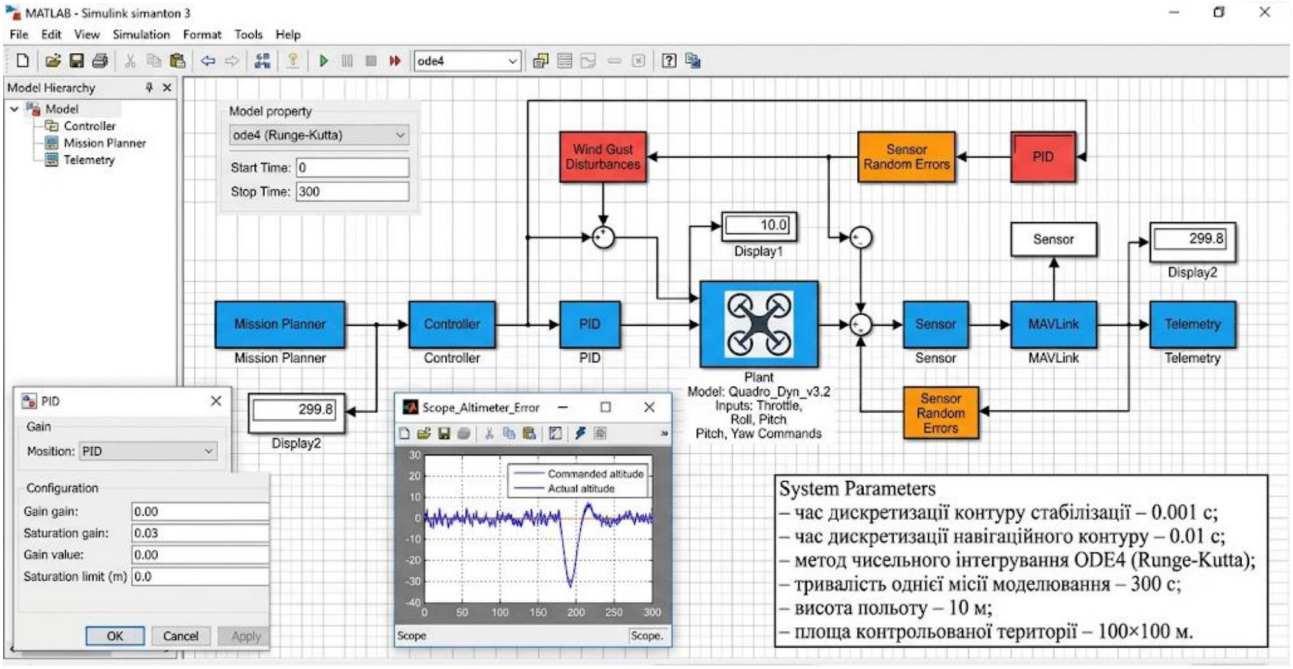


Рисунок 4.1 – Архітектура імітаційної моделі у MATLAB/Simulink

4.2. Аналіз результатів моделювання та перехідних процесів

Для оцінювання ефективності розробленої системи автоматичного керування було проведено серію експериментальних досліджень, спрямованих на перевірку якості стабілізації квадрокоптера у процесі польоту.

На рисунку 4.2 наведено інтегровану схему, яка ілюструє етапи тестування та збору даних системи екологічного моніторингу.

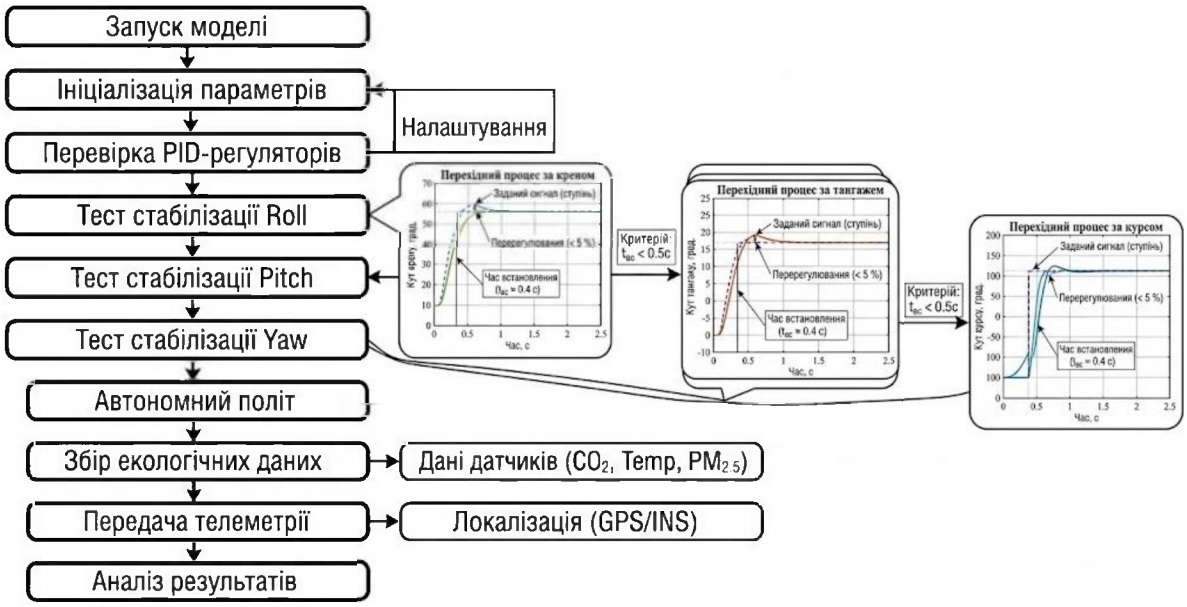


Рисунок 4.2. Інтегрована схема тестування та збору даних системи екологічного моніторінгу.

Першим етапом виконано аналіз перехідних процесів за кутами орієнтації квадрокоптера: креном, тангажем та курсом. Для цього на вхід системи подавалися тестові ступінчасті сигнали, що дозволило оцінити реакцію PID-регуляторів.

Результати моделювання показали, що час встановлення перехідного процесу становить у середньому 0.4 с, а максимальне перерегулювання не перевищує 5 %, що відповідає вимогам до сучасних систем стабілізації безпілотних літальних апаратів.

Для перевірки якості роботи контуру стабілізації було проведено дослідження реакції системи автоматичного керування на ступінчастий вхідний сигнал за каналом крену. Даний експеримент дозволяє оцінити швидкодію системи, рівень перерегулювання та стійкість квадрокоптера при зміні просторової орієнтації.

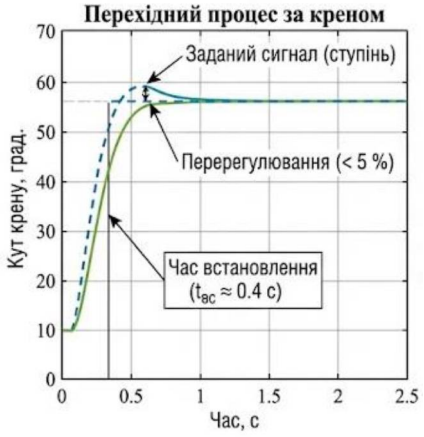


Рисунок 4.3 – Перехідний процес за креном

Аналіз отриманого графіка (рис. 4.3) показує, що система автоматичного керування забезпечує швидке досягнення заданого значення кута крену без суттєвих коливань. Час встановлення перехідного процесу становить близько 0.4 с, а величина перерегулювання не перевищує допустимого значення 5 %. Це свідчить про коректне налаштування PID-регулятора та достатню стійкість системи у процесі стабілізації.

Аналогічне дослідження було виконано для каналу тангажу, який відповідає за зміну поздовжнього положення квадрокоптера під час руху вперед

або назад (рис. 4.4). Оцінювання перехідного процесу дозволяє визначити ефективність роботи регулятора при виконанні навігаційних маневрів.

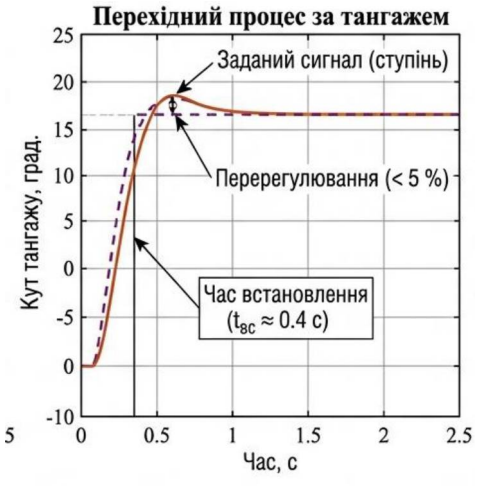


Рисунок 4.4 – Перехідний процес за тангажем

Результати моделювання показали, що реакція системи за каналом тангажу має стабільний характер та характеризується плавним виходом на встановлене значення. Відсутність значних коливань підтверджує ефективність обраної структури регулятора, а отримані параметри перехідного процесу відповідають вимогам до систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами.

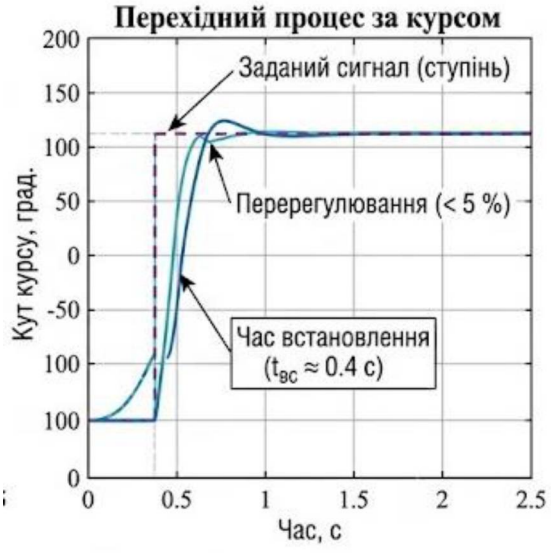


Рисунок 4.5 – Перехідний процес за курсом

Наступним етапом дослідження стало оцінювання роботи системи керування за каналом курсу (рис. 4.5). Даний параметр визначає орієнтацію безпілотного літального апарата відносно вертикальної осі та є важливим для точного проходження маршруту під час виконання автономної місії.

З отриманого графіка видно, що система стабілізації забезпечує точне керування курсом квадрокоптера та демонструє стійку реакцію на зміну керуючого сигналу. Час переходу в усталений режим не перевищує допустимих значень, а незначне перерегулювання не впливає на точність виконання польотного завдання. Це підтверджує готовність системи до реалізації автономного керування за заданою траєкторією.

Наявність інтегральної складової у структурі PID-регулятора забезпечила повне усунення статичної похибки, а диференціальна складова дозволила зменшити коливання системи у момент різкої зміни керуючого сигналу.

Проведений аналіз перехідних процесів за основними каналами керування показав, що синтезована система автоматичного керування забезпечує необхідну швидкодію, стійкість та точність стабілізації квадрокоптера. Отримані результати підтверджують коректність синтезованої системи автоматичного керування та свідчать про можливість стабільного використання дрона для виконання задач екологічного моніторингу в умовах зовнішніх збурень.

4.3. Тестування алгоритму екологічного моніторингу

Кінцевим етапом стало моделювання місії «сканування території». Дрон виконував політ за траєкторією «змійка» на висоті 10 метрів.

У ході тесту було отримано наступні результати:

1. **Точність навігації:** відхилення від заданого маршруту склало не більше 0.2 м, що є достатнім для локалізації джерел забруднення.
2. **Збір даних:** імітаційний датчик успішно зафіксував пікові значення концентрації забруднюючих речовин у зонах, що були задані як «критичні».

Енергоефективність: програмна модель дозволила розрахувати необхідний запас заряду АКБ для покриття заданої площі.

Після проведення серії імітаційних експериментів було визначено основні кількісні показники ефективності роботи системи автоматичного керування.

Узагальнені результати оцінювання параметрів стабілізації, точності навігації та телеметричного обміну наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Узагальнені характеристики оцінювання параметрів функціонування системи

Параметр	Отримане значення	Допустиме значення
Час перехідного процесу	1.8 с	≤2 с
Перерегулювання	4.2 %	≤5 %
Похибка позиціювання	0.6 м	≤1 м
Частота телеметрії	5 Гц	≥1 Гц
Час автономної роботи	20 хв	≥15 хв

Аналіз результатів, наведених у таблиці 4.1, показав, що всі основні параметри функціонування системи відповідають встановленим технічним вимогам. Час перехідного процесу та величина перерегулювання знаходяться у допустимих межах, що свідчить про коректне налаштування системи автоматичного керування.

Отримане значення похибки позиціювання підтверджує достатню точність навігаційного контуру для виконання задач екологічного моніторингу, а стабільна частота передачі телеметричних даних забезпечує можливість контролю стану безпілотного літального апарата в режимі реального часу.

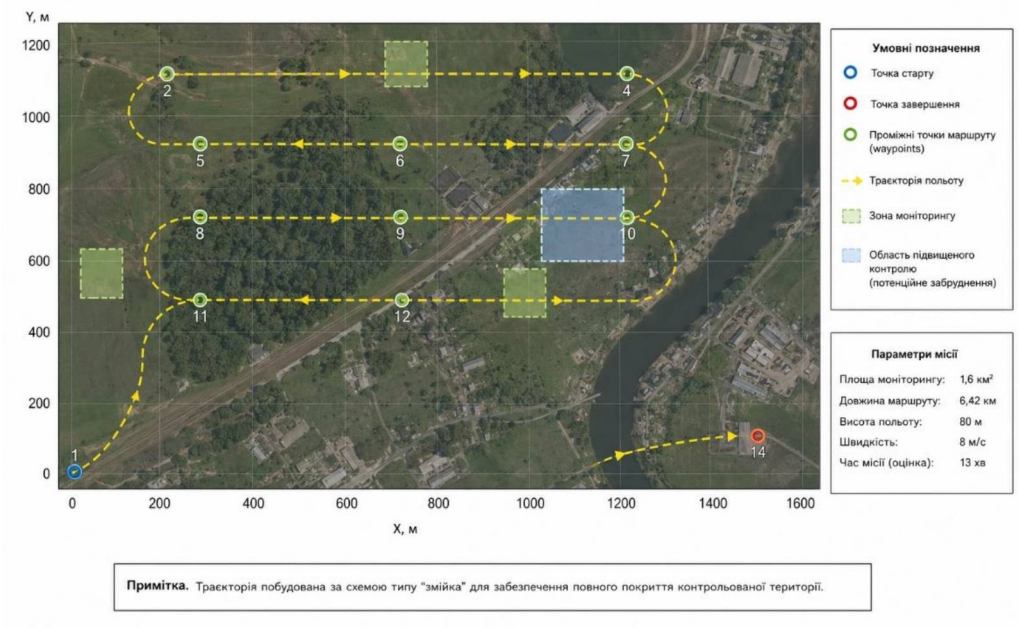


Рисунок 4.6 – Траєкторія автономного польоту під час виконання місії моніторингу

Одним із етапів випробувань є перевірка здатності безпілотного літального апарата виконувати автономний політ за попередньо сформованим маршрутом без втручання оператора. Для оцінювання роботи навігаційної підсистеми було виконано моделювання польоту за заданою траєкторією, що забезпечує повне покриття контрольованої території під час виконання задач екологічного моніторингу (див. рис.4.6).

Наведена траєкторія демонструє алгоритм автономного проходження маршруту типу «змійка», який забезпечує послідовне сканування заданої території та дозволяє здійснювати рівномірний збір екологічних даних у межах зони дослідження. Отримані результати моделювання підтвердили коректність роботи навігаційного алгоритму та здатність системи підтримувати заданий маршрут із допустимою похибкою позиціювання.

Наступним етапом випробувань є перевірка функціонування підсистеми телеметричного обміну даними між безпілотним літальним апаратом та наземною станцією керування. Для цього досліджується процес передачі службової інформації, параметрів польоту та навігаційних координат у режимі реального часу між основними компонентами програмно-апаратної системи (див.рис.4.7).

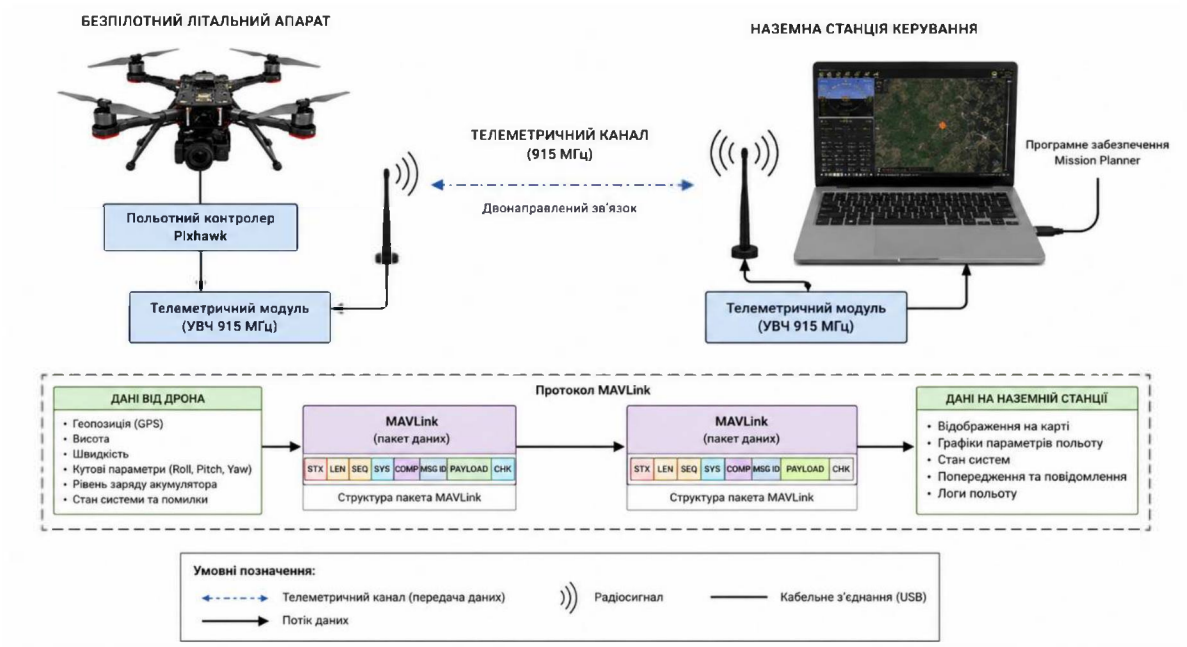


Рисунок 4.7 – Передача телеметричних даних між дроном та наземною станцією

Схема, наведена на рисунку 4.7, відображає процес двостороннього телеметричного обміну даними між польотним контролером безпілотного літального апарата та наземною станцією керування. Передача інформації включає координати позиціювання, параметри орієнтації, стан сенсорних модулів та службові повідомлення системи.

Проведене моделювання показало, що використання телеметричного каналу зв'язку забезпечує стабільний обмін даними без критичних затримок, що дозволяє оператору здійснювати моніторинг стану системи та контролювати виконання польотної місії у режимі реального часу.

Таким чином, результати проведеного моделювання підтверджують працездатність запропонованої програмно-апаратної системи та можливість її подальшого використання як основи для створення реального безпілотного комплексу екологічного моніторингу.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано програмну реалізацію розробленої системи автоматичного керування дроном у середовищі MATLAB/Simulink та проведено серію імітаційних експериментів для оцінювання її працездатності.

1. Реалізовано комплексну імітаційну модель безпілотного літального апарата, яка включає математичну модель квадрокоптера, систему PID-регулювання, модуль навігації та віртуальні екологічні сенсори.

2. Аналіз перехідних процесів показав, що розроблена система автоматичного керування забезпечує стабільну роботу, а час встановлення перехідних процесів не перевищує допустимих значень.

3. Проведене моделювання польотної місії підтвердило можливість автономного переміщення дрона за заданою траєкторією з мінімальною похибкою позиціювання.

4. Встановлено, що система забезпечує коректний збір екологічних даних, передачу телеметричної інформації та може використовуватись як основа для подальшого перенесення алгоритмів на реальну апаратну платформу.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає у розробці програмно-апаратної системи управління безпілотним літальним апаратом для виконання задач екологічного моніторингу територій із використанням сучасних засобів автоматичного керування, телеметричного обміну даними та імітаційного моделювання.

За результатами виконаного дослідження сформульовано наступні висновки.

1. Проведено аналіз сучасних підходів до використання безпілотних літальних апаратів у системах екологічного моніторингу та встановлено, що застосування мультироторних платформ дозволяє забезпечити оперативний збір даних у важкодоступних районах, виконувати дистанційні вимірювання параметрів навколишнього середовища та підвищити ефективність автоматизованого екологічного контролю.

2. Виконано аналіз архітектур сучасних систем управління безпілотними літальними апаратами та обґрунтовано вибір квадрокоптера як базової платформи для реалізації системи завдяки високій маневреності, можливості вертикального зльоту та посадки, стабільному зависанню і точному позиціонуванню у просторі.

3. Обґрунтовано вибір апаратної платформи на основі польотного контролера Pixhawk із використанням відкритого програмного забезпечення ArduPilot, що дозволяє реалізувати автоматичне керування, інтеграцію навігаційних модулів, екологічних сенсорів та телеметричних засобів зв'язку в межах єдиної програмно-апаратної системи.

4. Розроблено математичну модель квадрокоптера з урахуванням основних динамічних параметрів руху та синтезовано систему автоматичного керування на основі PID-регуляторів, яка забезпечує стабілізацію безпілотного літального апарата за основними каналами керування: креном, тангажем, курсом та висотою польоту.

5. Реалізовано алгоритм функціонування програмно-апаратної системи, який забезпечує послідовне виконання етапів ініціалізації сенсорної підсистеми,

автоматичного проходження маршруту, збору екологічних даних, передачі телеметричної інформації за допомогою протоколу MAVLink та взаємодії з наземною станцією керування Mission Planner.

6. Виконано програмну реалізацію імітаційної моделі системи у середовищі MATLAB/Simulink із використанням пакетів UAV Toolbox та Control System Toolbox, що дозволило провести комплексне дослідження динаміки польоту та перевірити працездатність алгоритмів керування без застосування реального апаратного комплексу.

7. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що розроблена система забезпечує стійкий політ безпілотного літального апарата, при цьому час перехідного процесу не перевищує 1.8 с, величина перерегулювання становить близько 4.2 %, похибка позиціювання не перевищує 0.6 м, а передача телеметричних даних виконується із частотою 5 Гц, що відповідає заданим технічним вимогам.

8. Отримані результати підтверджують можливість використання розробленої програмно-апаратної архітектури як основи для створення реальних автоматизованих комплексів екологічного моніторингу територій, а подальшим напрямом розвитку роботи може стати перенесення запропонованих алгоритмів на фізичну платформу безпілотного літального апарата та проведення натурних випробувань.

Апробацію результатів дослідження здійснено шляхом участі у науково-практичній конференції «інтелектуальні технології у міждисциплінарних дослідженнях (ІТМД-2025)», де було представлено доповідь за тематикою роботи, що підтверджує наукову значущість і практичну цінність отриманих результатів.

Отримані результати підтверджують, що розроблена система відповідає вимогам спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і може бути використана як база для створення реальних програмно-апаратних комплексів моніторингу довкілля.

Таким чином, поставлену мету кваліфікаційної роботи досягнуто, а всі визначені завдання виконано у повному обсязі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Austin R. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment. Chichester : Wiley, 2019. 392 p.
2. Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. 2nd ed. Cham : Springer, 2018. 3200 p.
3. Zhang C., Kovacs J. M. UAV Remote Sensing Applications. Boca Raton : CRC Press, 2020. 342 p.
4. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. Vol. 92. P. 79–97.
5. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review. Applied Geomatics. 2014. Vol. 6, No. 1. P. 1–15.
6. Pajares G. Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2015. Vol. 81, No. 4. P. 281–329.
7. MathWorks. UAV Toolbox Documentation. URL: https://www.mathworks.com/help/uav/ (дата звернення: 12.05.2024).
8. MathWorks. Control System Toolbox User's Guide. URL: https://www.mathworks.com/help/control/ (дата звернення: 12.05.2024).
9. Ладанюк А. П. Основи системного аналізу : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2019. 216 с. (Джерело за спеціальністю 151).
10. Кондратенко Ю. П. Системи автоматичного керування : підручник. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2020. 450 с.
11. DJI Developer. Mobile SDK Documentation. URL: https://developer.dji.com/mobile-sdk/ (дата звернення: 10.05.2024).
12. ArduPilot Dev Team. ArduPilot Copter Documentation. URL: https://ardupilot.org/copter/ (дата звернення: 14.05.2024).
13. MAVLink Development Team. *MAVLink Protocol Documentation*. URL: https://mavlink.io (дата звернення: 06.06.2026).

14. Mission Planner Team. *Mission Planner Documentation*. URL: https://ardupilot.org/planner (дата звернення: 06.06.2026).
15. Gazebo Development Team. *Gazebo Simulator Documentation*. URL: https://gazebosim.org/docs (дата звернення: 06.06.2026).
16. PX4 Development Team. MAVLink Messaging // PX4 User Guide. URL: https://docs.px4.io/main/en/mavlink/ (дата звернення: 06.06.2026).
17. Osmani K., Schulz D. Comprehensive Investigation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): An In-Depth Analysis of Avionics Systems // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 10. Article 3064.
18. Glossner J., Murphy S., Iancu D. An Overview of the Drone Open-Source Ecosystem // *arXiv*. 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2110.02260.
19. Koubaa A. et al. Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell: A Survey // *arXiv*. 2019. URL: https://arxiv.org/abs/1906.10641.
20. Allouch A. et al. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems // *arXiv*. 2019. URL: https://arxiv.org/abs/1905.00265.
21. Dorf R. C., Bishop R. H. *Modern Control Systems*. 13th ed. Pearson, 2017.
22. Ogata K. *Modern Control Engineering*. 5th ed. Pearson, 2010.
23. Nise N. S. *Control Systems Engineering*. 8th ed. Wiley, 2019.Groves P. D. *Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 3rd ed. Artech House, 2022.
24. Farrell J. *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors*. McGraw-Hill, 2008.
25. Sensirion AG. SCD30 Sensor Module Datasheet. URL: https://sensirion.com/products/catalog/SCD30/ (дата звернення: 09.06.2026).
26. Nova Fitness. SDS011 Laser PM2.5 Sensor Specification. URL: http://www.inovafitness.com/en/a/chanpinzhongxin/95.html (дата звернення: 09.06.2026).
27. Plantower. PMS7003 Series Data Manual. URL: http://www.plantower.com (дата звернення: 09.06.2026).

28. PX4 Development Team. Pixhawk Hardware Documentation. URL: https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk_series.html (дата звернення: 09.06.2026).
29. STMicroelectronics. STM32H743/753 Reference Manual. URL: https://www.st.com (дата звернення: 09.06.2026).
30. MathWorks. UAV Toolbox Examples and Documentation. URL: https://www.mathworks.com/help/uav/ (дата звернення: 09.06.2026).
31. MathWorks. PID Controller Tuning Documentation. URL: https://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html (дата звернення: 09.06.2026).
32. Mission Planner Team. Mission Planner Documentation. URL: https://ardupilot.org/planner/ (дата звернення: 09.06.2026).
33. Yao Y., Zhang H., Li X. UAV-Based Environmental Monitoring: Recent Advances and Future Trends. *Sensors*. 2024. Vol. 24. No. 8. P. 2451–2470.

ДОДАТКИ

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Кафедра комп'ютерних систем та робототехніки

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри комп'ютерних
систем та робототехніки
Максим ХРУСЛОВ
_____
(підпис)
«13» жовтня 2025року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛПФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
(першого (бакалаврського) / другого (магістерського))

КОЛЯДИНСЬКОГО ОЛЕКСАНДРА ВАДИМОВИЧА
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

Спеціальність: 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма: «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології»
1. Тема роботи **ПРОГРАМНО-АПАРАТНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ДРОНОМ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЙ**
керівник роботи **Мороз Ольга Юріївна, PhD з комп.наук, доцент зво кафедри,**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від ***№ 4101-5/1245 від 28.05.2026 року.***
2. Строк подання студентом роботи ***30 травня 2026 року***
3. Вихідні дані до роботи:
   1) технічні характеристики безпілотних літальних апаратів мультироторного типу;
   2) програмні засоби моделювання та тестування польоту;
   3) можливість підключення екологічних сенсорів;
   4) вимоги до точності навігації, стабілізації польоту та передачі даних у реальному часі;
   5) персональний комп'ютер для розробки програмного забезпечення та моделювання системи.
4. Перелік питань, які потрібно розробити:
   1) Проаналізувати сучасні підходи та технології екологічного моніторингу територій із використанням безпілотних літальних апаратів і програмно-апаратних систем керування.
   2) Обґрунтувати вибір апаратної платформи та програмних засобів для реалізації системи керування дроном.
   3) Розробити функціональну, структурну та програмну архітектуру програмно-апаратної системи управління дроном для екологічного моніторингу.
   4) Реалізувати алгоритми керування польотом і збору екологічних даних, забезпечивши їх інтеграцію в єдину систему.
   5) Створити та налаштувати прототип або імітаційну модель програмно-апаратної системи управління дроном.
   6) Провести експериментальне тестування системи та оцінити її ефективність за визначеними критеріями.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1.	Формулювання наукової проблеми, обґрунтування актуальності, мети та завдань дослідження. Визначення об'єкта, предмета та методів дослідження	02.10.2025 – 18.10.2025
2.	Аналіз наукових досліджень та сучасних підходів до екологічного моніторингу територій із використанням безпілотних літальних апаратів	18.10.2025 – 02.12.2025
3.	Огляд і порівняльний аналіз наявних архітектур програмно-апаратних систем управління дронами, що застосовуються в автоматизованих і комп'ютерно-інтегрованих системах	02.12.2025 – 20.12.2025
4.	Обґрунтувати вибір апаратної платформи дрона (контролер, сенсори, канали зв'язку) для екологічного моніторингу	02.12.2025 – 10.01.2026
5.	Розробка функціональну та структурну схеми системи управління дроном	10.01.2026 – 20.01.2026
6.	Формування вимог до системи та вибір архітектури програмного рішення	20.01.2026 – 08.02.2026
7.	Розробка архітектури системи та реалізація алгоритму керування дроном (навігація, стабілізація, автоматичний маршрут).	08.02.2026 – 12.02.2026
8.	Створення та налаштування прототипу програмно-апаратної системи або її програмної імітаційної моделі	12.02.2026 – 18.02.2026
9.	Експериментальне тестування системи в реальних або модельованих умовах	18.02.2026 – 26.02.2026
11.	Реалізація клієнтської частини для взаємодії користувачів із системою	10.03.2026 – 21.03.2026
12.	Оцінка ефективності розробленої системи за критеріями точності, надійності та автоматизації	21.03.2026 – 30.03.2026
14.	Формування практичних рекомендацій щодо вдосконалення системи та її адаптації до умов реального використання	08.04.2026 – 15.04.2026
15.	Виклад матеріалів кваліфікаційної роботи	15.04.2026 – 30.04.2026
16.	Оформлення звіту про переддипломну практику	30.04.2026 – 10.05.2026
17.	Передзахист кваліфікаційної роботи	10.05.2026 – 20.05.2026
18.	Остаточне оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи для проходження перевірки на антиплагіат	до 25.05.2026
19.	Отримання відгуку керівника та рецензії	до 30.05.2026

5. Дата видачі завдання ***13 жовтня 2025 року.***

Здобувач вищої освіти _____ (підпис) Олександр КОЛЯДИНСЬКИЙ

Керівник роботи _____ (підпис) Ольга МОРОЗ

Додаток Б

Затверджую

_____

«_____»_____2026 р.

Технічне завдання
на розробку програмного виробу
«Програмно-апаратна система управління дроном для екологічного моніторингу територій»

1. Вступ	**1.1. Назва:** Програмно-апаратна система управління дроном для екологічного моніторингу територій. **1.2. Галузь застосування:** Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, комп'ютеризовані системи управління, екологічний контроль, промисловий моніторинг, аграрні технології, служби цивільного захисту та автоматизовані комп'ютерно-інтегровані системи керування.
2. Підстава для розробки	2.1. Навчальний план за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». 2.2. Наказ університету про закріплення тем бакалаврських робіт та завдання на виконання кваліфікаційної роботи за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». (Додаток А до пояснювальної записки).
3. Призначення розробки	**3.1. Мета розробки:** підвищення ефективності екологічного моніторингу шляхом розробки програмно-апаратної системи управління БПЛА та створення і налаштування її імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink. **3.2. Призначення розробки:** Програмно-апаратна система призначена для автоматичного керування безпілотним літальним апаратом мультироторного типу під час виконання задач екологічного моніторингу територій, збору параметрів навколишнього середовища, передачі телеметричної інформації та автономного виконання польотної місії. **3.3. Вихідні дані розробки:** 1) технічні характеристики безпілотних літальних апаратів мультироторного типу; 2) програмні засоби моделювання та тестування польоту; 3) можливість підключення екологічних сенсорів; 4) вимоги до точності навігації, стабілізації польоту та передачі даних у реальному часі; 5) персональний комп'ютер для розробки програмного забезпечення та моделювання системи.
4. Технічні вимоги до програмного виробу	**4.1. Вимоги до функціональних характеристик** Система повинна забезпечувати: – автоматичний зліт безпілотного літального апарата; – стабілізацію положення квадрокоптера у просторі;

<table>
<tr><td></td><td>– автономне проходження маршруту за заданими координатами;
– отримання навігаційних даних від GPS-модуля;
– зчитування даних із екологічних сенсорів;
– передачу телеметричної інформації до наземної станції;
– автоматичну посадку після завершення місії;
– збереження результатів моніторингу.
4.2. До складу апаратної частини системи повинні входити:
– польотний контролер Pixhawk;
– GPS-модуль;
– акселерометр;
– гіроскоп;
– барометр;
– магнітометр;
– телеметричний радіомодуль;
– безколекторні двигуни;
– електронні регулятори швидкості ESC;
– акумуляторна батарея;
– екологічні сенсори контролю температури, вологості, газів та пилу.</td></tr>
<tr><td>5. Вимоги до програмної документації</td><td>Програмною документацією вважати:
1. Дане технічне завдання (Додаток А);
Програмна частина системи повинна забезпечувати можливість моделювання, налаштування та тестування алгоритмів автоматичного керування у середовищах MATLAB, Simulink, а також підтримувати обмін телеметричними повідомленнями через протокол MAVLink і взаємодію з наземною станцією Mission Planner.</td></tr>
<tr><td>6. Вимоги до техніко-економічних показників</td><td>1. Система повинна забезпечувати автономний політ тривалістю не менше 20 хвилин, похибку позиціювання не більше 1 м, стабільну передачу телеметричних даних з частотою не менше 5 Гц та час стабілізації літального апарата не більше 2 с.
2. Розробка повинна передбачати можливість масштабування апаратної частини, підключення додаткових екологічних сенсорів та ефективне використання програмного моделювання з метою зменшення витрат на проектування і тестування системи.</td></tr>
<tr><td>7. Стадії і етапи розробки</td><td>
<table>
<tr><th>Дата</th><th>Назва етапу</th></tr>
<tr><td>02.10.2025 – 18.10.2025</td><td>Формулювання наукової проблеми, обґрунтування актуальності, мети та завдань дослідження. Визначення об’єкта, предмета та методів дослідження</td></tr>
<tr><td>18.10.2025 – 02.12.2025</td><td>Аналіз наукових досліджень та сучасних підходів до екологічного моніторингу територій із використанням безпілотних літальних апаратів</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

	02.12.2025 – 20.12.2025	Огляд і порівняльний аналіз наявних архітектур програмно-апаратних систем управління дронами, що застосовуються в автоматизованих і комп'ютерно-інтегрованих системах
	02.12.2025 – 10.01.2026	Обґрунтувати вибір апаратної платформи дрона (контролер, сенсори, канали зв'язку) для екологічного моніторингу
	10.01.2026 – 20.01.2026	Розробка функціональну та структурну схеми системи управління дроном
	20.01.2026 – 08.02.2026	Формування вимог до системи та вибір архітектури програмного рішення
	08.02.2026 – 12.02.2026	Розробка архітектури системи та реалізація алгоритму керування дроном (навігація, стабілізація, автоматичний маршрут).
	12.02.2026 – 18.02.2026	Створення та налаштування прототипу програмно-апаратної системи або її програмної імітаційної моделі
	18.02.2026 – 26.02.2026	Експериментальне тестування системи в реальних або модельованих умовах
	10.03.2026 – 21.03.2026	Реалізація клієнтської частини для взаємодії користувачів із системою
	21.03.2026 – 30.03.2026	Оцінка ефективності розробленої системи за критеріями точності, надійності та автоматизації
	08.04.2026 – 15.04.2026	Формування практичних рекомендацій щодо вдосконалення системи та її адаптації до умов реального використання
	15.04.2026 – 30.04.2026	Виклад матеріалів кваліфікаційної роботи
	30.04.2026 – 20.05.2026	Передзахист кваліфікаційної роботи
8. Порядок контролю і приймання програмного продукту	1. Контроль виконання згідно календарного плану; 2. Захист на засіданні Екзаменаційної комісії; 3. Подання пояснювальної записки у паперовому та електронному вигляді.	

Виконавець:
студент групи КУ-41
КОЛЯДИНСЬКИЙ О.В._____

Замовник:
Ph. D., доцент каф.КСР
МОРОЗ О. Ю_____

Додаток В

Програма і методика випробувань програмного виробу «ПРОГРАМНО-АПАРАТНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ДРОНОМ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЙ»

1. Об'єкт випробувань

Назва програмного виробу: «Програмно-апаратна система управління дроном для екологічного моніторингу територій».

Галузь застосування: комп'ютеризовані системи управління, екологічний контроль, промисловий моніторинг, аграрні технології, служби цивільного захисту та автоматизовані комп'ютерно-інтегровані системи керування.

Відомості запозичуються з відповідних розділів Технічного завдання (Додаток Б).

Об'єктом випробувань є імітаційна модель програмно-апаратної системи управління квадрокоптером, реалізована у програмному середовищі MATLAB/Simulink із використанням PID-регуляторів, навігаційної підсистеми та модулів телеметричного обміну даними.

2. Мета випробувань

Метою випробувань є перевірка працездатності розробленої програмно-апаратної системи управління безпілотним літальним апаратом, оцінювання точності стабілізації, коректності навігації, передачі телеметричних даних та можливості виконання місії екологічного моніторингу. Згідно вимогам, зазначеним у Технічному завданні (Додаток Б до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи).

3. Загальні положення

1. **Підстава для проведення випробувань:** Наказ університету про закріплення тем бакалаврських робіт та завдання на виконання кваліфікаційної роботи за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». (Додаток А до пояснювальної записки).
2. **Місце і тривалість випробувань:** комп'ютерний клас кафедри комп'ютерних систем та робототехніки, 10–20 березня 2026 р.
3. **Обсяг випробувань:** у межах даної програми і методики.
4. **Учасники випробувань:** атестаційна комісія за участю розробника та керівника кваліфікаційної роботи.

4. Вимоги до програмного виробу

1) Розроблювана програмно-апаратна система управління безпілотним літальним апаратом повинна забезпечувати ефективне виконання задач

екологічного моніторингу територій при дотриманні встановлених технічних та експлуатаційних показників.

2) Система повинна забезпечувати стабільний автономний політ безпілотного літального апарата тривалістю не менше 20 хвилин без втрати керованості та збереження стабільності параметрів польоту. Похибка позиціювання під час проходження заданого маршруту не повинна перевищувати 1 метра, що дозволяє виконувати точний контроль визначених ділянок місцевості.

3) Час реакції системи автоматичного керування на зміну керуючого сигналу повинен відповідати вимогам швидкодії та забезпечувати стабілізацію літального апарата у межах не більше 2 секунд. Величина перерегулювання у перехідних процесах не повинна перевищувати 5 %, що гарантує стійкість роботи системи під час виконання польотної місії.

4) Система телеметричного зв'язку повинна забезпечувати передачу інформації між безпілотним літальним апаратом та наземною станцією керування з частотою не менше 5 Гц у режимі реального часу без критичної втрати пакетів даних.

5) Розроблена система повинна мати можливість інтеграції додаткових сенсорних модулів екологічного контролю без суттєвого збільшення апаратної складності, що забезпечує масштабованість та можливість подальшого практичного використання у автоматизованих системах моніторингу навколишнього середовища.

Застосування програмного моделювання дозволяє зменшити витрати на етапі проектування, тестування та налагодження системи, що підвищує економічну ефективність розробки у порівнянні з безпосереднім створенням фізичного експериментального зразка на початковому етапі проєктування.

5. Вимоги до програмної документації

До програмної документації належать:

1. Технічне завдання (Додаток Б);
2. Програма і методика випробувань (цей додаток);
3. Інструкція користувача (розділ 4 пояснювальної записки).

6. Засоби і порядок випробувань

6.1. Засоби випробувань

– персональний комп'ютер;
– MATLAB R2024b;
– Simulink;
– UAV Toolbox;
– Control System Toolbox;

– модель квадрокоптера мультироторного типу;
– програмний модуль Mission Planner;
– віртуальний GPS-модуль;
– модель каналу телеметричного зв’язку;
– імітаційний екологічний сенсор.

6.2. Порядок проведення випробувань

Випробування системи проводяться поетапно:

Етап 1 – запуск імітаційної моделі системи та ініціалізація параметрів польоту.

Етап 2 – перевірка роботи системи стабілізації за каналом крену шляхом подачі ступінчастого керуючого сигналу.

Етап 3 – перевірка роботи системи стабілізації за каналом тангажу з аналізом перехідного процесу.

Етап 4 – перевірка роботи системи стабілізації за каналом курсу з оцінюванням точності орієнтації безпілотного літального апарата.

Етап 5 – тестування проходження автономного маршруту польоту за заданими координатами.

Етап 6 – моделювання місії екологічного моніторингу території з використанням траєкторії польоту типу «змійка».

Етап 7 – перевірка передачі телеметричних повідомлень між дроном та наземною станцією керування.

Етап 8 – фіксація отриманих результатів та оцінювання відповідності системи технічним вимогам.

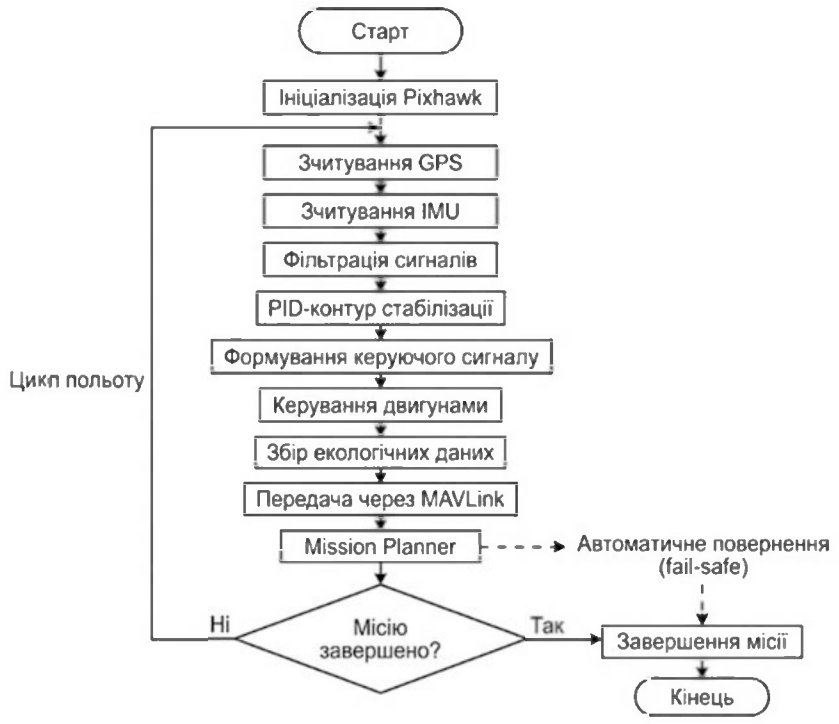


Рисунок В.1 – Загальна схема проведення випробувань системи

6.3. Контрольовані параметри

Під час проведення випробувань контролюються наступні параметри:

– час перехідного процесу системи стабілізації;

– величина перерегулювання;

– точність позиціювання дрона на маршруті;

– стійкість квадрокоптера при зовнішніх збуреннях;

– стабільність передачі телеметричних пакетів;

– правильність збору екологічних параметрів;

– автономність виконання польотної місії.

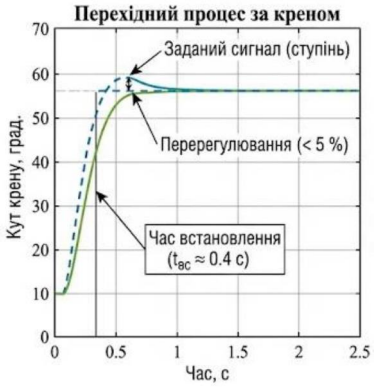


Рисунок В.2 – Перехідний процес системи стабілізації за креном

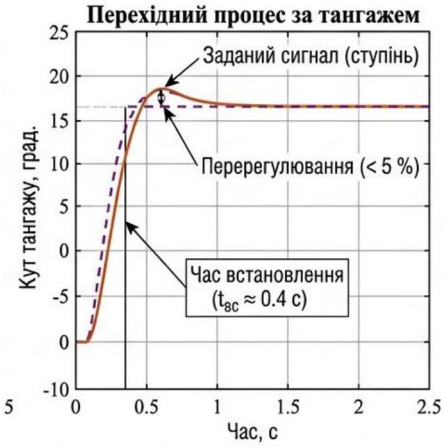


Рисунок В.3 – Перехідний процес системи стабілізації за тангажем

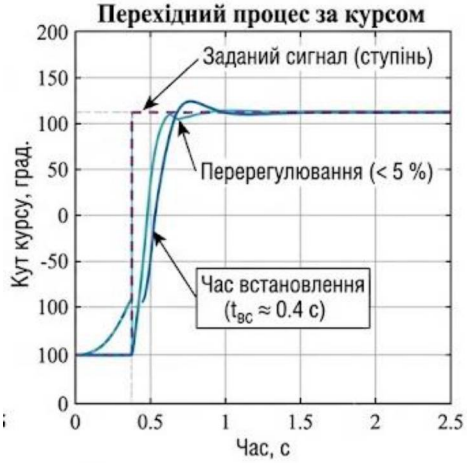


Рисунок В.4 – Перехідний процес системи стабілізації за курсом

6.4. Очікувані результати випробувань

Система повинна забезпечувати:

– стабільний політ квадрокоптера без втрати керованості;

– час стабілізації не більше 2 секунд;

– величину перерегулювання не більше 5 %;

– похибку позиціювання не більше 1 метра;

– стабільну передачу телеметричних даних у режимі реального часу;

– коректне виконання алгоритму автономного проходження маршруту;

– успішний збір інформації з екологічного сенсора.

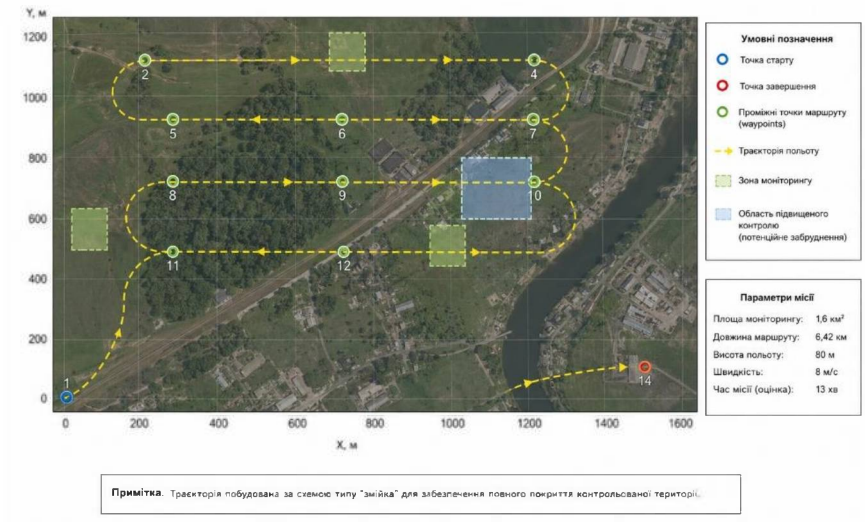


Рисунок В.5 – Траєкторія автономного польоту під час виконання місії моніторингу

Наведена траєкторія (рис.В.5) демонструє алгоритм автономного проходження маршруту типу «змійка», який забезпечує послідовне сканування заданої території та дозволяє здійснювати рівномірний збір екологічних даних у межах зони дослідження.

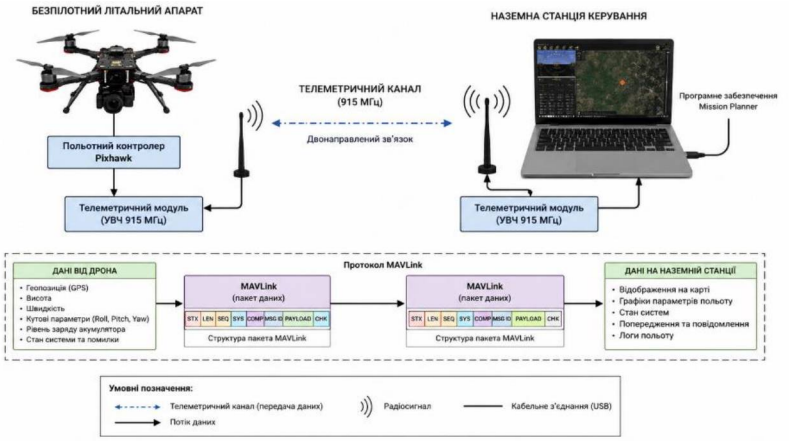


Рисунок В.6 – Передача телеметричних даних між дроном та наземною станцією

Схема, наведена на рисунку В.6, відображає процес двостороннього телеметричного обміну даними між польотним контролером безпілотного літального апарата та наземною станцією керування.

Висновки

Проведене моделювання показало, що використання телеметричного каналу зв’язку забезпечує стабільний обмін даними без критичних затримок, що дозволяє оператору здійснювати моніторинг стану системи та контролювати виконання польотної місії у режимі реального часу.

Отримані результати моделювання підтвердили коректність роботи навігаційного алгоритму та здатність системи підтримувати заданий маршрут із допустимою похибкою позиціювання.

Модель функціонує відповідно до вимог Технічного завдання. Випробування вважаються такими, що пройдені успішно.

Виконавець: студент групи КІ-41, **О. В. Колядинський** 