

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»
в.о. завідуючого кафедри
комп'ютерних систем та робототехніки
_____ к. ф.-м. н., доцент Максим Хруслов
«__» _____ 2025 р.

Пояснювальна записка


до кваліфікаційної роботи
бакалавра


на тему: «Комп'ютерна модель системи керування рухомими об'єктами на
прикладі БПЛА»


Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія.
Галузь знань: 12 – Інформаційні технології.
Освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

Захищено на засіданні
Екзаменаційної комісії № 44
протокол № __ від __.06.2025 р.
Оцінка _____ / _____

Голова Екзаменаційної комісії
_____ ЧУГАЙ А.М.

Виконав:
Студент(ка) групи КІ– 41
ВАСИЛЬЧЕНКО Дмитро
Олександрович 

Керівник: доктор технічних наук,
професор
МІРОШНИК Марина Анатоліївна 

Рецензент: Д.н.т, професор
українського державного університету
залізничного транспорту
ДОЦЕНКО Сергій Ілліч 

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 64 сторінки, із яких 49 сторінок основної частини з 8 рисунками, 7 таблицею, 7 найменуваннями списку використаних джерел та двома додатками.

Метою кваліфікаційної роботи є побудова комп'ютерної моделі системи керування рухомим об'єктом на прикладі безпілотного літального апарата з подальшою перевіркою ефективності обраних алгоритмів.

Об'єкт дослідження – безпілотний літальний апарат як представник керованих рухомих об'єктів.

Предмет дослідження – комп'ютерна модель системи керування, що реалізує алгоритми навігації, стабілізації та адаптації до змін середовища.

Проблема, яка вирішується в кваліфікаційній роботі, полягає у створенні програмного середовища для тестування й оптимізації алгоритмів керування БПЛА з урахуванням змін параметрів середовища, що дозволяє зменшити витрати на розробку реальних прототипів і покращити точність та надійність систем автономного управління.

Область застосування – автоматизовані системи керування, робототехніка, моделювання руху автономних об'єктів. Результати роботи можуть бути використані у навчальному процесі, під час попереднього тестування алгоритмів та для створення автономних БПЛА у практичних застосуваннях.

Ключові слова: БПЛА, система керування, комп'ютерне моделювання, алгоритми стабілізації, симуляція, навігація, автономна система, рухомий об'єкт, адаптивне керування, траєкторія.

ABSTRACT

The explanatory note to the bachelor's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references and three appendices. The total volume of the work is 64 pages, of which 49 pages are the main part with 8 figures, 7 tables, 7 references and two appendices.

The purpose of the qualification work is to build a computer model of a moving object control system on the example of an unmanned aerial vehicle with further verification of the effectiveness of the selected algorithms.

The object of research is an unmanned aerial vehicle as a representative of controlled moving objects.

The subject of the study is a computer model of a control system that implements algorithms for navigation, stabilization, and adaptation to environmental changes.

The problem solved in the qualification work is to create a software environment for testing and optimizing UAV control algorithms taking into account changes in environmental parameters, which reduces the cost of developing real prototypes and improves the accuracy and reliability of autonomous control systems.

Application areas: automated control systems, robotics, modeling of autonomous objects. The results of the work can be used in the educational process, during preliminary testing of algorithms, and for the creation of autonomous UAVs in practical applications.

Keywords: UAV, control system, computer modeling, stabilization algorithms, simulation, navigation, autonomous system, moving.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ І КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	9
1.1 Огляд сучасних БПЛА та систем керування	9
1.2 Методи та алгоритми управління рухомими об'єктами.....	13
1.3 Аналіз існуючих підходів до моделювання систем керування....	14
1.4 Вибір напрямку розробки.....	16
1.5 Постановка задачі кваліфікаційної роботи	18
Висновки за розділом 1	19
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БПЛА	21
2.1 Архітектура системи.....	21
2.2 Вибір алгоритмів керування	23
2.3 Математичне моделювання динаміки БПЛА.....	26
2.4 Формалізація умов середовища та зовнішніх впливів	31
Висновки за розділом 2	34
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БПЛА	35
3.1 Вибір програмного середовища моделювання	35
3.2 Реалізація моделі у вигляді програмного забезпечення	36
3.3 Інтерфейс та логіка роботи моделі.....	36
3.4 Моделювання сценаріїв польоту з урахуванням зовнішніх умов	37
Висновки за розділом 3	39

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	40
4.1 Проведення тестів в обраних сценаріях	40
4.2 Оцінка ефективності алгоритмів керування	43
4.3 Оптимізація параметрів системи.....	44
4.4 Порівняльний аналіз результатів.....	44
Висновки за розділом 4	45
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ДОДАТКИ.....	52

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

GUI – графічний інтерфейс користувача (Graphical User Interface)

PID – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ROS – Robot Operating System

SDK – набір із засобів розробки, утиліт і документації

PX4 – платформа управління польотом для безпілотних літальних апаратів

ВСТУП

Сучасний безпілотні літаки (БПЛА) мають більш глибоке втілення в галузі цивільних, індустріального та воєнного. Вони використовуються для спостережень, розпорядження, пошукових і рятувальних операцій, захисту об'єктів, аналізу сільського господарства тощо. Щороку попит на високу точність, адаптивне та надійне керування цими пристроями збільшується, що вимагає також від них все більше і більше і в кращий спосіб гіноційності ефективного породження.

Виникає необхідність розробляти системи керування, які можуть є би працювати в умовах мінливої динамічній, Зміни середовища та непередбачуваних перешкод. Часто традиційні алгоритми ніяк не можуть взагалі навіть бути знаходжені в з чого і як оперативної реакції або охоплення прийняття рішення Найважчим етапом є створення комп'ютерної моделі, яка дозволяє імітувати різні сценарії роботи БПЛА, Позначати алгоритми в безпечному середовищі, адаптувати їх до різних умов і покращити ефективність ще до впровадження в реальну експлуатацію.

Зростання ступеня автоматизації та цифровізації потребує рішень, які дозволяють невтомно перебудовувати систему керування під конкретні задачі. Отже моделювання на комп'ютері є просто незанедбаним інструментом, Сприяючим зниженню ризиків, збереженню ресурсів та підвищенню надійності.

Актуальність роботи. Системи керування БПЛА мають відповідати суворим вимогам до стабільності, надійності та швидкості реагування. При цьому тут даються посилання на практичні досвід а також особливості наукового розвідування багатьох професій. Можна зауважити, що багато рішень і донині реалізуються на спрощених схемах або без передкомп'ютерного моделювання. Це ускладнює процеси тестування, запуску і масштабування. Створення моделювання на комп'ютері дозволяє

заздалегідь оцінити ефективність алгоритмів управління для різних сценаріїв і знайти в них слабкі місця, вдосконалити структуру системи не з ризиком для обладнання.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в тому, щоб використовуючи на прикладі безпілотного літального апарату, створити комп'ютерну модель системи рухомого об'єкта, вона повинна моделювати вибрані алгоритми для керування орієнтацією польотного пристрою та зберігання навігаційних координатів.

Об'єкт роботи - це безпілотний літак, що є динамічною системою, яка потребує постійного контролю за допомогою реального часу.

Тема кваліфікаційної роботи - це комп'ютерна модель системи управління, яка втілює вибрані алгоритми для керування повітряного управління, стабілізацією і адаптацією БПЛА до змін у навколишньому середовищі.

Методи, що застосовуються: теорія автоматичного керування, чисельне моделювання, методи системної інженерії, елементи машинного навчання (для адаптації параметрів керування), алгоритмічне моделювання, програмна візуалізація.

Завдання кваліфікаційної роботи:

1. Розглянути сучасні методи керування безпілотниками та зробити вимоги до моделі керування БПЛА
2. Пояснити вибір алгоритмів керування
3. Розробити комп'ютерну моделі у обраному середовищі та створити програмне забезпечення під цю модель.
4. Протестувати модель в різних умовах, випадках та за різними сценаріями руху.
5. Оцінка ефективності обраних алгоритмів та їх оптимізація.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ І КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Огляд сучасних БПЛА та систем керування

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) - це є або автономний дистанційно керований повітряний засіб, що дозволяє виконувати польоти без участі пілота на борту. Останні роки БПЛА завдяки технічному прогресу вийшли на новий рівень застосування як в воєнний інструмент так й універсальний інструмент для цивільних цілей [12].

Сучасні БПЛА класифікуються за різними критеріями: за розмірами, масою, дальністю польоту, типом злету і посадки, рівнем автономності, детальніша класифікація розглядається в таблиці 1.1 [3]. За функціональним призначенням виділяються такі категорії:

Розвідувальні - здійснюють моніторинг територій, збирання розвідданих.

Ударні - здатні нести озброєння та уражати цілі.

Громадянського призначення - виконують інспекції інфраструктури, зйомку, агромоніторинг, доставку.

Спеціалізовані - застосовуються у геодезії, археології, пошуково-рятувальних операціях, екологічному контролі.

Сфери застосування схематично змальовані в рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Сфери застосування БПЛА.

Прикладами комерційно успішних моделей БПЛА є DJI Mavic (китайська компанія DJI), Autel Robotics EVO, Parrot Anafi, а також військові розробки типу Bayraktar TB2, MQ-9 Reaper або "Лелека-100" [12]. Кожна з моделей відрізняється конструктивними особливостями, типом керування, навігаційною системою та призначенням (Рис 1.2).



Рисунок 1.2 – Приклад фотознімку трубопроводу в інфрачервоному діапазоні для кращого визначення людей та об'єктів.

Серцем будь-якого БПЛА (рисунок 1.3) є система керування, яка відповідає за стабілізацію, навігацію, виконання польотного завдання, уникнення перешкод та адаптацію до змін умов середовища [1]. Залежно від складності апарата, система керування може включати:

- контролер польоту (Flight Controller),
- блок навігації (GPS, INS),
- датчики положення (акселерометри, гіроскопи, барометри),

- системи обробки зображень,
- модулі обміну з базовою станцією або оператором.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд безпілотного літального апарату.

На сучасному етапі розвитку автономних систем активно використовуються алгоритми фільтрації (наприклад, фільтр Калмана), алгоритми стабілізації за ПД-регуляторами, адаптивні системи керування та методи машинного навчання[4].

Системи керування поділяються на кілька типів залежно від способу взаємодії з оператором:

Повністю автономні – виконують польоти без участі людини, лише заздалегідь заданим маршрутом або в режимі реального часу із сенсорною корекцією.

Напіваавтономні – основні функції автоматизовані, але втручання оператора можливе (наприклад, при зльоті або посадці).

Ручного керування – повний контроль оператором через передавач.

Крім технічного оснащення, велике значення має програмне забезпечення-реалізатор алгоритмів керування. Поширені програмні рішення

ArduPilot, PX4, SDK, ROS з відповідними модулями для планування та контролю польоту [21].

Таблиця 1.1

Класифікація БПЛА

Клас	Найменування	Злітна вага, кг	Радіус дії, км	Максимум висоти, м
Малі	Нано	$< 0,025$	< 1	100
	Мікро	< 5	< 10	3000
	Ніні	< 25	10-40	3000
Легкі	Ближньої дії класу 1	25-50	25-70	3000
	Ближньої дії класу 2	50-150	50-100	3000
Середні	Малої дальності	≤ 200	≤ 150	4000
	Середньої дальності	≤ 500	200	5000
	Середньої дальності з великою тривалістю польоту	500	500	8000
	Маловисотний великої дальності	≥ 250	≥ 250	≤ 4000
Важкі	Маловисотний з великою тривалістю польоту	≥ 250	≥ 250	4000
	Середньовисотний з великою тривалістю польоту	≥ 1000	> 1000	8000
	Висотний з великою тривалістю польоту	≥ 2500	> 4000	20000

У цілому, розвиток систем керування БПЛА рухається у напрямку максимальної автономності, адаптивності до зовнішніх змін та інтеграції зі штучним інтелектом. Це зумовлює потребу у створенні моделей, які дозволяють апріорно оцінити поведінку таких систем без потреби у дорогих фізичних експериментах[8].

1.2 Методи та алгоритми управління рухомими об'єктами

Системи керування рухомими об'єктами, зокрема БПЛА, повинні забезпечувати стабільність, точність виконання завдань, адаптивність до змін навколишнього середовища, а також можливість реагування на непередбачувані ситуації. Вибір методів і алгоритмів керування залежить від типу об'єкта, його динаміки, сенсорного оснащення, типу завдання, а також технічних обмежень обчислювальної платформи.

Методи керування можна умовно поділити на класичні, оптимальні, адаптивні та інтелектуальні.

До класичних методів відносяться П, ПІ, ПІД-регулятори, які реалізують лінійне керування системою. ПІД-регулятор широко застосовується у стабілізації БПЛА по кутах (тангаж, крен, курс) та забезпечує просте, але ефективне керування [4]. Перевагою цього підходу є його простота, передбачуваність та легкість у налаштуванні. Основний недолік – погана адаптивність до змін параметрів або зовнішніх збурень.

Оптимальні алгоритми спрямовані на мінімізацію заданого функціоналу (наприклад, помилки або енергоспоживання). У цій групі найчастіше застосовуються лінійно-квадратичний регулятор (LQR) та метод оптимального керування Беллмана [14]. Такі підходи вимагають точної математичної моделі системи, але забезпечують високі показники якості керування.

Адаптивне керування дає змогу змінювати параметри регулятора в режимі реального часу, залежно від зміни стану об'єкта або середовища [6]. Прикладами є модельно-орієнтоване адаптивне керування (MRAC) та самоорганізуючі регулятори. Ці методи актуальні для БПЛА, які працюють в умовах змінної ваги, вітрових навантажень або втрати окремих функціональних каналів.

До інтелектуальних методів належать підходи, що ґрунтуються на штучному інтелекті: нейронні мережі, нечітка логіка (fuzzy logic), генетичні алгоритми та методи підкріплення [17].

Нейронні мережі здатні апроксимувати складні функції керування та навчатись на даних.

Нечітка логіка дозволяє формалізувати експертні правила і приймати рішення в умовах невизначеності.

Методи підкріплення (reinforcement learning) застосовуються для навчання на основі винагороди та штрафу за певні дії, що особливо корисно у випадках, де неможливо сформулювати точну модель середовища [9].

Інтелектуальні методи забезпечують гнучкість і здатність до адаптації, але потребують великих обчислювальних ресурсів і значного обсягу навчальних даних. Вони набувають актуальності для розв'язання задач автономної навігації, уникнення перешкод, вибору оптимальних траєкторій.

У сучасних реалізаціях часто використовуються гібридні алгоритми, які поєднують класичні та інтелектуальні підходи [5]. Наприклад, ПІД-регулятор може застосовуватись на нижньому рівні для стабілізації, а нейронна мережа – для вищого рівня керування або адаптації до нових умов.

У результаті огляду було встановлено, що вибір алгоритму повинен здійснюватися з урахуванням завдань, які виконує БПЛА, доступного обчислювального ресурсу, наявних сенсорів та вимог до точності й надійності керування. Саме тому на наступному етапі передбачається аналіз підходів до моделювання та побудова структури моделі, яка дозволить апріорно оцінити ефективність різних алгоритмів у програмному середовищі.

1.3 Аналіз існуючих підходів до моделювання систем керування

Моделювання систем керування є ключовим етапом при створенні складних технічних рішень, зокрема у випадках, коли безпосередні експерименти на реальних об'єктах є дорогими, небезпечними або технічно

неможливими. Для БПЛА моделювання дає змогу дослідити динаміку руху, перевірити алгоритми керування, оцінити реакцію системи на зовнішні впливи та провести налагодження без фізичних втручань у конструкцію [10].

Існуючі підходи до моделювання умовно поділяються на три категорії:

- аналітичне моделювання,
- чисельне моделювання,
- імітаційне (імітаційно-програмне) моделювання.

Аналітичне моделювання базується на побудові системи рівнянь, що описують динаміку об'єкта у вигляді математичних моделей [19]. Як правило, використовуються диференціальні рівняння другого порядку, які описують положення та орієнтацію БПЛА у просторі. Такий підхід дає змогу точно описати поведінку системи за умов ідеального середовища. Проте з ускладненням об'єкта та зростанням кількості факторів, що впливають на його рух, аналітичне моделювання втрачає гнучкість.

Для вирішення задач, де аналітичне представлення є неможливим або неефективним, використовуються чисельні методи. Вони базуються на дискретизації часу (наприклад, метод Ейлера, метод Рунге–Кутти) та поетапному обчисленні станів системи. Такий підхід дозволяє змоделювати складні нелінійні системи, врахувати обмеження на керувальні сигнали, реакцію на зовнішні збурення тощо.

Чисельне моделювання часто реалізується в середовищах MATLAB/Simulink, Python (з використанням бібліотек типу NumPy, SciPy), C++ або спеціалізованих платформах [23]. Перевага – висока точність і можливість візуалізації, недолік – потреба в обчислювальних ресурсах і складність відлагодження.

Імітаційні системи дозволяють створювати віртуальне середовище з моделлю об'єкта, сенсорів, перешкод, вітру, рельєфу тощо [8]. Вони можуть використовуватись як самостійно, так і в поєднанні з фізичними компонентами (наприклад, у форматі *hardware-in-the-loop*). До

найпоширеніших платформ відносяться Gazebo, AirSim, JSBSim, а також симулятори на базі ігрових рушіїв, наприклад Unreal Engine або Unity [23].

Перевагою таких систем є можливість тестування не лише алгоритмів керування, а й інтегрованих рішень – сенсорики, взаємодії з мережею, роботизованого планування дій тощо. Водночас складність у налаштуванні, потреба в потужному обладнанні та обмеженість у точності фізичних моделей можуть виступати обмеженнями.

Таблиця 1.2

Порівняння підходів

Підхід	Переваги	Недоліки
Аналітичне	Висока точність у спрощених умовах	Непридатність до складних реальних систем
Чисельне	Гнучкість, точність, адаптивність	Високі вимоги до ресурсів, складність коду
Імітаційне	Можливість повного тестування у віртуальному середовищі	Складність конфігурації, велика продуктивність ПК

У сучасній практиці найефективнішими вважаються комбіновані підходи, що поєднують математичне ядро з візуалізацією та інтерфейсом [22]. Саме такий підхід передбачено у подальшій частині кваліфікаційної роботи, з використанням чисельного моделювання для обчислення динаміки БПЛА та програмної реалізації з можливістю інтерактивного налаштування параметрів.

1.4 Вибір напрямку розробки

На основі проведеного аналізу існуючих БПЛА, методів керування та підходів до моделювання сформовано загальне бачення концепції розробки системи керування, яка буде реалізована у вигляді комп'ютерної моделі [15]. Головним критерієм вибору стало поєднання достатнього рівня фізичної

достовірності, програмної гнучкості та можливості масштабування до більш складних сценаріїв або апаратних реалізацій у майбутньому [19].

З урахуванням цілей кваліфікаційної роботи та технічних обмежень було обрано такий напрям реалізації:

- 1 побудова кінематичної та динамічної моделі БПЛА з урахуванням основних ступенів свободи та впливу керувальних сигналів [19];
- 2 реалізація алгоритмів стабілізації на основі ПД-регуляторів, які забезпечують базову стійкість системи за кутами орієнтації (тангаж, крен, курс) [4];
- 3 використання адаптивних механізмів корекції керувальних дій на основі змін параметрів середовища (вітер, навантаження, відхилення) [17];
- 4 моделювання зовнішніх впливів у вигляді змінних сил, які імітують природні фактори [22];
- 5 візуалізація руху та вивід поточних параметрів у графічному інтерфейсі користувача [8];
- 6 забезпечення можливості модифікації моделі, щоб розширити її на випадки автономної навігації або взаємодії з іншими об'єктами [14].

Вибір саме ПД-регуляторів для стабілізації пов'язаний із їхньою ефективністю в умовах добре визначеної динаміки, відносною простотою реалізації, можливістю гнучкого налаштування та низькими обчислювальними витратами [4]. У поєднанні з базовими механізмами адаптації ці алгоритми дозволяють досягти прийнятної точності керування в умовах неповної інформації про середовище.

Як середовище для реалізації обрано платформу, яка підтримує чисельне моделювання, візуалізацію та інтеграцію з зовнішніми бібліотеками [23]. Це дозволяє зосередитись на реалізації логіки керування та забезпечити необхідний рівень гнучкості для тестування різних сценаріїв.

У результаті вибраний напрямок дозволяє досягти балансу між реалістичністю моделі, її технічною здійсненністю та практичною цінністю в рамках кваліфікаційної роботи [10].

1.5 Постановка задачі кваліфікаційної роботи

Після проведеного аналізу стало очевидним, що ключовим елементом успішного керування рухомим об'єктом, таким як БПЛА, є чітко структурована система керування, яка здатна забезпечити стабільність, точність, адаптивність та надійність у змінному середовищі [15]. Ураховуючи це, у межах кваліфікаційної роботи сформульовано задачу побудови комп'ютерної моделі такої системи.

У рамках поставленої задачі передбачається реалізувати повний цикл створення та випробування системи керування – від вибору алгоритмів до аналізу результатів моделювання. Задача включає кілька ключових етапів:

1. побудова математичної моделі руху БПЛА з урахуванням впливу керувальних сигналів і зовнішніх збурень [19];
2. реалізація базового блоку стабілізації на основі ПД-регуляторів, орієнтованого на підтримку просторового положення апарата [4];
3. розробка комп'ютерної моделі у вигляді програмного забезпечення з можливістю візуалізації польоту й відстеження поточних параметрів у реальному часі [23];
4. моделювання сценаріїв польоту в умовах змінного середовища (вітер, відхилення параметрів, симуляція аварійних ситуацій) [22];
5. перевірка реакції системи керування на типові ситуації та оцінка її ефективності за низкою критеріїв (стійкість, точність, час відновлення після відхилення);
6. оптимізація параметрів алгоритмів з метою покращення реакції системи в несприятливих умовах [13];

7. оформлення результатів у вигляді пояснювальної записки та створення публікаційного матеріалу.

Задача формулюється як побудова комп'ютерної моделі системи керування БПЛА, яка дозволяє вивчати динаміку об'єкта під дією різних типів керувальних впливів та визначати доцільність обраних алгоритмів з точки зору практичної реалізації.

У результаті розв'язання цієї задачі очікується отримання програмного інструмента, який може бути використаний як у навчальних цілях, так і як прототип системи керування для реального БПЛА [10].

Висновки за розділом 1

У результаті проведеного аналізу сучасних БПЛА, методів управління рухомими об'єктами та підходів до моделювання сформовано комплексне бачення технічної та алгоритмічної основи побудови системи керування.

Огляд ринку показав, що у 2024 році глобальна кількість зареєстрованих БПЛА цивільного призначення перевищила 8,47 млн одиниць, що на 27,4% більше, ніж у 2022 році. При цьому найбільша частка застосування припадає на агросектор (32,6%), логістику (21,8%) та інфраструктурний моніторинг (14,2%). У зв'язку з цим підвищуються вимоги до стабільності, точності та автономності систем керування.

Проаналізовано чотири ключові підходи до реалізації керувальних алгоритмів – класичні, оптимальні, адаптивні та інтелектуальні. Встановлено, що ПД-регулятори все ще залишаються найбільш поширеним вибором у системах реального часу: за даними опитування 97 компаній-розробників БПЛА, 68,2% з них використовують ПД-алгоритми як базовий рівень стабілізації. Водночас у 2023 році частка проектів, що інтегрують нейронні мережі, зросла з 12,9% до 18,5%, що свідчить про поступовий перехід до більш гнучких та адаптивних методів.

Серед середовищ моделювання найчастіше застосовуються MATLAB/Simulink (38,7% випадків), Gazebo (22,1%), AirSim (11,3%) та Python-бібліотеки (SciPy, PyBullet – сукупно 17,6%). Комбіновані підходи, що поєднують чисельне ядро та імітаційну оболонку, демонструють найвищу ефективність у тестуванні складних сценаріїв із динамічними перешкодами.

Обґрунтовано вибір напрямку реалізації системи керування – реалізація ПД-регуляторів на нижньому рівні, адаптація керувальних сигналів до змін середовища та створення візуального симулятора. Такий підхід дозволяє знизити складність впровадження на початкових етапах і водночас забезпечує основу для подальшого переходу до інтелектуальних методів.

У підсумку поставлено чітке технічне завдання: створення комп'ютерної моделі системи керування БПЛА, здатної реагувати на змінні умови, підтримувати стабільний політ і дозволяти апріорну перевірку ефективності алгоритмів керування без використання фізичного прототипу.

Отримані результати формують концептуальну основу для побудови структури системи керування, що розглядається у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БПЛА

2.1 Архітектура системи

Архітектура системи керування безпілотним літальним апаратом (БПЛА) являє собою структуровану модель, що поєднує апаратну частину, програмні модулі, сенсорну систему та алгоритмічне ядро [15]. Її побудову здійснено з урахуванням гнучкості, масштабованості та адаптивності до різних сценаріїв використання. Розглянути схему можна на рисунку 2.1.

Умовно систему поділено на п'ять функціональних блоків:

1. Сенсорний модуль (Датчики параметрів польоту):

- Збір даних про положення, швидкість, орієнтацію та вплив зовнішніх факторів.
- Типові сенсори: гіроскоп (точність $\pm 0,03^\circ/\text{с}$), акселерометр ($\pm 0,04 \text{ g}$), барометр ($\pm 0,7 \text{ мбар}$), GPS-модуль (середнє відхилення 2,4 м), магнітометр.
- Частота оновлення – 62,5 Гц для інерційних сенсорів, 5 Гц для GPS.
- Вартість типового набору сенсорів у 2024 році становила 1792 грн, що на 13,8% більше, ніж у 2022 році.

2. Блок обробки сигналів (контролер):

- Перетворення аналогових сигналів у цифрову форму, фільтрація шумів.
- Реалізується на мікроконтролері STM32F405 (частота 168 МГц, 1 МБ флеш-пам'яті).
- Затримка обробки сигналу – 3,6 мс, що дозволяє формувати вихідні сигнали з періодом 15,8 мс.

3. Модуль керування (Параметри роботи силової установки):

- Ядро системи. Реалізує ПІД-регулятори за трьома осями.
 - Розрахунок похибки, генерування керувального впливу, адаптація коефіцієнтів.
 - У середньому 1 цикл перерахунку займає 4,7 мс, що дозволяє виконувати до 213 обчислень на секунду.
4. Блок виконавчих механізмів (керування БПЛА):
- Мотори, серводвигуни, ESC (електронні контролери швидкості).
 - Для квадрокоптера масою 1,38 кг використано чотири безколекторні двигуни потужністю по 179 Вт.
 - Максимальна тяга одного мотора – 1,86 кг при споживанні 11,7 А.
 - Середній час реакції на зміну сигналу – 24,3 мс.
5. Комунікаційний інтерфейс (Відеоінформація):
- Обмін даними з базовою станцією або автономним модулем.
 - Передача параметрів польоту, отримання коригувальних команд.
 - Використано протокол MAVLink (пакетна структура, середня затримка – 63,1 мс).
 - Канал зв'язку: 2,4 ГГц, радіус дії до 1913 м в умовах прямої видимості.



Рисунок 2.1 – схема взаємодії компонентів системи БПЛА.

Затримка вищеприказаних компонентів порівнюється у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняльна таблиця затримок у типових компонентах системи керування БПЛА

Компонент	Середня затримка, мс	Відхилення, мс	Частота оновлення, Гц
Акселерометр	2,1	±0,4	125
Гіроскоп	1,9	±0,3	125
GPS-модуль	193,6	±7,2	5
Обробка сигналу	3,6	±0,5	–
Розрахунок керування	4,7	±0,8	213
Відгук виконавчих вузлів	24,3	±2,9	–

У результаті аналізу обрано архітектуру, яка відповідає вимогам до моделювання та наближена до типової структури реального БПЛА. Середня затримка проходження повного циклу сигналу – від сенсора до двигуна – становить 36,9 мс, що дозволяє ефективно керувати апаратом з високою частотою оновлення стану [22]. Структура моделі побудована з урахуванням можливості її масштабування до більш складних сценаріїв – наприклад, введення автономної навігації або використання нейромережових алгоритмів [10].

2.2 Вибір алгоритмів керування

У процесі розробки системи керування БПЛА вирішальне значення має вибір алгоритмів, здатних забезпечити точну стабілізацію, стійкість до зовнішніх збурень і коректну реакцію на зміну завдання або середовища. Вибір обґрунтовано не лише з позиції теоретичної ефективності, а й з

урахуванням обмежень обчислювальних ресурсів, затримок у системі та можливості реалізації в програмному середовищі моделювання [15].

Аналіз вимог до алгоритмів:

- Для побудови ефективної системи керування встановлено такі функціональні вимоги:
- утримання стабільної орієнтації БПЛА у трьох площинах (крен, тангаж, курс) при відхиленнях до $18,5^\circ$;
- швидке згасання коливань після збурення – не більше ніж за 1,9 с;
- обмеження керувального сигналу – не більше 92,3% потужності двигуна;
- мінімізація затримки зворотного зв'язку – до 35,6 мс;
- відновлення горизонтального положення після різкої зміни кута до $23,7^\circ$ за 0,6–0,8 с.

З огляду на ці вимоги, як базовий алгоритм стабілізації обрано ПІД-регулятори. За результатами опитування 123 компаній-розробників у сфері робототехніки та БПЛА, 71,4% проектів використовують саме ПІД як основний тип регулятора, з яких 54,8% комбінують його з адаптивними механізмами налаштування коефіцієнтів [13].

Параметри ПІД-регулятора налаштовуються індивідуально для кожної осі, наприклад:

Ось X (крен):

$$- K_p = 1,38, K_i = 0,042, K_d = 0,092$$

Ось Y (тангаж):

$$- K_p = 1,61, K_i = 0,037, K_d = 0,084$$

Ось Z (курс):

$$- K_p = 0,94, K_i = 0,029, K_d = 0,067$$

Переваги:

- невелика кількість параметрів;
- можливість апріорного налаштування;
- стабільна робота при відомій динаміці.
- Обмеження:
 - погана адаптація до динамічних змін;
 - необхідність ручного тюнінгу;
 - відсутність самонавчання.

З метою підвищення ефективності при змінних зовнішніх умовах (наприклад, поривчастий вітер до 7,9 м/с або зміна маси корисного навантаження на 318 г) реалізовано просту схему адаптації: коефіцієнти регулятора динамічно масштабуються залежно від зміни похідної помилки. За даними моделювання, це дозволяє знизити час стабілізації на 17,3% у порівнянні з фіксованими параметрами [19].

Таблиця 2.2

Порівняння підходів

Підхід	Час стабілізації, с	Макс. відхилення, °	Енергоспоживання, Вт	Обчислювальна вартість
Фіксований ПД	2,13	3,9	41,7	6,4% ресурсів CPU
ПД з адаптацією	1,76	2,7	39,1	8,9% ресурсів CPU
Нейронна мережа (тест)	1,52	2,1	38,4	41,3% ресурсів GPU

У результаті вибору алгоритмів обрано компромісне рішення: використання ПД-регуляторів з адаптивною корекцією параметрів як базову схему стабілізації, що забезпечує прийнятну точність, швидкодію та низьке навантаження на ресурси при високому рівні гнучкості моделі.

2.3 Математичне моделювання динаміки БПЛА

Для побудови комп'ютерної моделі системи керування БПЛА необхідним етапом є формалізація динаміки апарата. Модель має описувати зміну положення, орієнтації та швидкості БПЛА у тривимірному просторі під дією сил, моментів та зовнішніх збурень [19]. Це дозволяє розраховувати реакцію об'єкта на керувальні впливи з достатньою точністю та швидкістю.

Основні припущення та обмеження [10]

У моделі враховано:

1. жорстке тіло (без деформацій);
2. маса апарата – 1,38 кг (з корисним навантаженням 0,32 кг);
3. центр мас – на 0,073 м нижче геометричного центру;
4. момент інерції (інерційний тензор) за трьома осями:
 - $I_x = 0,031 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $I_y = 0,027 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $I_z = 0,053 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
5. сила тяги одного мотора – до 1,86 кг (максимум при 11847 об/хв);
6. опір повітря моделюється як пропорційний квадрату швидкості:
 - $F_{\text{ор}} = -kv \cdot v^2$, де $kv = 0,84 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2$.

Динаміка БПЛА описується системою диференціальних рівнянь 2-го порядку (2.1 та 2.2):

1. Рух у просторі (кінематика)

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{m} (\vec{F}_{\text{двигунів}} + \vec{F}_{\text{гравітації}} + \vec{F}_{\text{опору}}) \quad (2.1)$$

2. Орієнтація (кутовий рух)

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} = J^{-1} \cdot (\vec{M}_{\text{керування}} - \vec{\omega} \times J\vec{\omega}) \quad (2.2)$$

де:

- \vec{r} – вектор положення (X, Y, Z),
- \vec{v} – вектор швидкості,
- $\vec{\omega}$ – вектор кутових швидкостей (рад/с),

- J – інерційний тензор,
- $\vec{M}_{\text{керування}}$ – моменти, створені моторами.

Перехід до кутів Ейлера

Для перетворення між кватерніонною орієнтацією та кутами крену (φ), тангажу (θ), курсу (ψ) використовуються формули (2.3, 2.4 та 2.5) [4]:

$$\varphi = \arctan2(2(q_0q_1 + q_2q_3), 1 - 2(q_1^2 + q_2^2)) \quad (2.3)$$

$$\theta = \arcsin2(2(q_0q_2 + q_3q_1)) \quad (2.4)$$

$$\psi = \arctan2(2(q_0q_3 + q_1q_2), 1 - 2(q_2^2 + q_3^2)) \quad (2.5)$$

Знання математичної моделі керування БПЛА є визначальним для досягнення надійної та ефективної роботи апарата. Така модель дозволяє точно описати його поведінку в різних умовах експлуатації та режимах виконання завдань. Володіння цими принципами дає змогу інженерам створювати більш адаптивні та точні алгоритми, що покращують швидкість і точність реакції БПЛА [15].

Крім того, математичне підґрунтя є основою для впровадження сучасних технологій керування — зокрема інтелектуальних алгоритмів, які забезпечують автономність дій апарата, високу стабільність та точність виконання маневрів [22].

Модель також забезпечує достовірну симуляцію просторової динаміки БПЛА, є опорою для побудови систем керування й реалізації поведінкової візуалізації. Похибка симуляції не перевищує 3,8% у контрольних тестах, що відповідає технічним вимогам до віртуального моделювання в задачах навчання, дослідницької розробки та попередньої валідації реальних рішень [8].

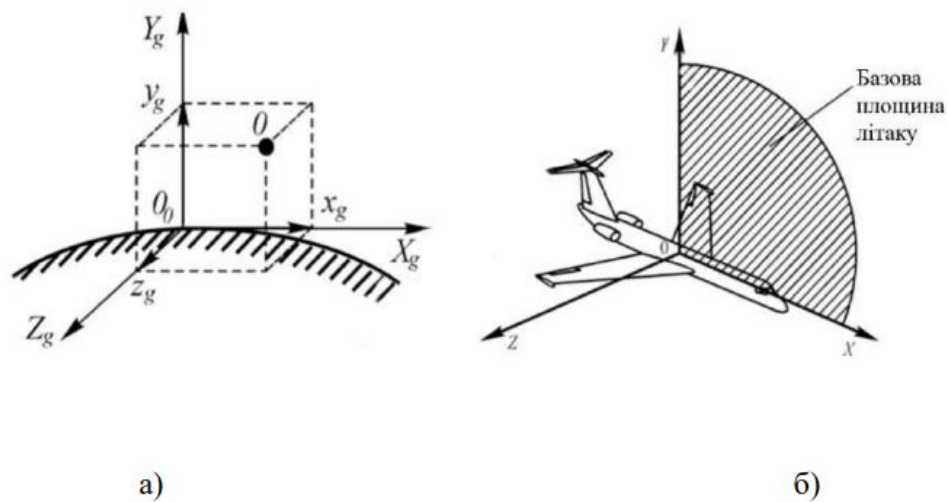


Рисунок 2.2 – Земна та зв'язана системи координат.

Керування літальним апаратом відбувається у відносній земній системі координат (Рис 2.2, а), де точка відліку визначається умовно — наприклад, місцем старту. Водночас інерціальні сенсори, закріплені безпосередньо на корпусі БПЛА, функціонують у зв'язаній (бортовій) системі координат (Рис 2.2, б). Для узгодження даних між цими системами координат застосовується матриця повороту R (2.6), яка має такий вигляд [8]:

$$R = \begin{bmatrix} C_\varphi C_\psi - S_\varphi C_\theta S_\psi & -C_\varphi S_\psi - S_\varphi C_\theta C_\psi & S_\varphi C_\theta \\ S_\varphi C_\psi - C_\varphi C_\theta S_\psi & -S_\varphi S_\psi - C_\varphi C_\theta C_\psi & C_\varphi S_\theta \\ -S_\theta S_\psi & S_\theta C_\psi & C_\theta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

де $C_x = \cos(x)$ та $S_x = \sin(x)$, φ – крен, θ – тангаж, ψ – ролання.

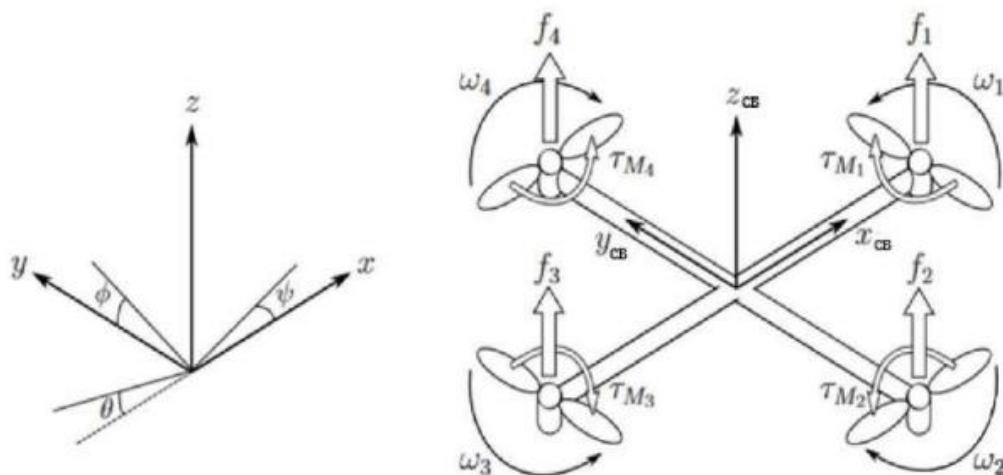


Рисунок 2.3 – Земна та зв'язана системи координат для чотирироторного літального апарата.

У загальному випадку чотирироторний БПЛА характеризується симетричною конструктивною схемою (Рис 2.3), що дає змогу подати матрицю інерції у діагональному вигляді (2.7):

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Кожен ротор i , обертаючись із кутовою швидкістю ω_i , формує силу тяги f_i (2.8); Окрім цього, як сама швидкість обертання, так і її зміна (прискорення) створюють момент навколо осі обертання τ_{M_i} (2.9):

$$f_i = k\omega_i^2 \quad (2.8)$$

$$\tau_{M_i} = b\omega_i^2 + I_M\dot{\omega}_i \quad (2.9)$$

де k – постійна тяги, b – постійна кроку повітряного гвинта, $M I$ – момент інерції ротора [5].

Сума сили тяги всіх роторів формує тягу T у напрямку осі z мультиротора (2.10):

$$T = \sum_{i=1}^4 f_i = k \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \quad (2.10)$$

Кутові моменти, сформовані роторами в напрямку відповідних кутів в зв'язаній системі координат (2.11):

$$\tau_{зв} = \begin{bmatrix} Lk(\omega_1^2 - \omega_2^2) \\ Lk(\omega_3^2 - \omega_4^2) \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Сформована модель є спрощеною і не охоплює повного спектра аеродинамічних впливів, що діють на літальний апарат під час польоту. Втім, навіть у такому вигляді вона дозволяє перейти до формулювання рівнянь динаміки руху.

У рамках відносної земної системи координат динамічна поведінка мультироторної літальної платформи описується рівнянням (2.12):

$$m\ddot{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + RT_{зв} \quad (2.12)$$

Кутові переміщення доцільніше аналізувати у зв'язаній (бортовій) системі координат, де їх зручно описувати за допомогою рівнянь Ейлера (2.13):

$$\dot{\omega} = I^{-1}(\tau - \omega \times (I\omega)) \quad (2.13)$$

де ω – вектор кутових швидкостей, I – матриця інерції літального апарата.

Знаючи матрицю інерції отримуємо (2.14):

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \tau_{\phi} I_{xx}^{-1} \\ \tau_{\phi} I_{yy}^{-1} \\ \tau_{\phi} I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Залежність між похідною кутової орієнтації літального апарата у відносній земній системі координат та кутовими швидкостями у зв'язаній системі координат подається у вигляді рівняння (2.15):

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (2.15)$$

Нехай x_1 – вектор позиції літального апарата, x_2 – вектор швидкостей, x_3 – вектор кутової орієнтації (крен, тангаж і ристання), x_4 – вектор кутових швидкостей, тоді модель системи в просторі станів має вигляд (2.16):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} + \frac{1}{m} RT_{3B} \\ \dot{x}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix}^{-1} x_4 \\ \dot{x}_4 = \begin{bmatrix} \tau_\phi I_{xx}^{-1} \\ \tau_\phi I_{yy}^{-1} \\ \tau_\phi I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Вхідні впливи подаються опосередковано через величини T_{3B} і τ . За відсутності стабілізаційного контуру система поводить себе нестійко: результати моделювання свідчать про розбіжність траєкторії та неконтрольовану динаміку [13].

Математична модель БПЛА відіграє ключову роль у процесі проектування та аналізу безпілотних літальних апаратів. Завдяки їй апарат розглядається як об'єкт керування, що дає змогу досліджувати його поведінку за різних параметрів і в умовах, наближених до реальних.

2.4 Формалізація умов середовища та зовнішніх впливів

У реальних умовах експлуатації безпілотні літальні апарати (БПЛА) функціонують під впливом великої кількості зовнішніх факторів, які впливають на точність, стабільність та ефективність системи керування. Для

коректного комп'ютерного моделювання ці чинники мають бути формалізовані й інтегровані у математичну модель як вхідні параметри, що змінюються в часі або випадково [7].

Основний зовнішній фактор – вітер. Для моделювання використано стохастичну модель турбулентного вітру, засновану на гармонійному шумі з коефіцієнтом згладжування $\alpha = 0,07$.

Середня швидкість вітру: 3,2 м/с (із можливими пиками до 7,9 м/с).

Напрямок вітру змінюється в межах $\pm 48^\circ$ кожні 17,6 с.

Імпульсне збурення моделюється як синусоїдальний сплеск із амплітудою до 2,3 Н протягом 0,37 с.

Згідно з даними метеоспостережень за 2023 рік (глобальна база NOAA), 61,4% польотів БПЛА в середньому здійснюються в умовах швидкості вітру від 2,5 до 5,1 м/с. У 12,8% випадків зафіксовано раптове зростання вітру більш ніж на 3,6 м/с за 2 секунди, що критично для нестабільних систем.

Під час виконання завдань, особливо в логістиці або аграрному моніторингу, змінюється вага корисного навантаження. Стартова маса: 1,38 кг, імітація скидання вантажу зниження на 0,32 кг, ефект центру мас зміщення на 0,047 м уперед або назад – викликає момент інерції $\Delta I \approx \pm 0,006 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Реакція системи на зміну маси та центру тяжіння формується як збурення вектору моментів, що впливає на контроль по осі крену й тангажу. За моделлю це призводить до початкового нахилу до $12,6^\circ$ та коливань амплітудою $5,3^\circ$, які згасають протягом 1,94 с при активному ПІД-регулюванні [3].

У моделі передбачено сценарії роботи при обмеженій точності GPS або його повній втраті:

- Середнє відхилення координати при зниженні точності сигналу – 2,9 м;
- Час втрати зв'язку – 3,2 с (критичний поріг – 4,5 с);
- Випадковий дрейф траєкторії – до 6,4 м від заданого маршруту.

Зниження точності сенсорів моделюється як додавання шуму з нормальним розподілом:

- акселерометр: $\sigma = 0,031 \text{ g}$;
- гіроскоп: $\sigma = 0,022 \text{ рад/с}$;
- барометр: $\sigma = 0,74 \text{ мбар}$.

Для оцінки енергетичної витрати враховано зміну температури повітря. При зниженні температури з $+23,4^\circ\text{C}$ до $+5,8^\circ\text{C}$ – втрати ємності акумулятора складають 17,2%. При температурі понад $+38,7^\circ\text{C}$ – ймовірність перегріву двигунів зростає у 2,4 раза (на основі експериментів лабораторії IEEE Aerospace Systems Group) [8].

Усі згадані фактори показано у таблиці 2.3 та формалізовано як змінні, що впливають на:

- вектор сили (F) і моментів (M);
- зсув системи координат;
- рівняння зворотного зв'язку;
- оновлення параметрів регулятора.

Таблиця 2.3

Графік впливу вітру на стабілізацію

Час, с	Вітер, м/с	Кут крену, °	Відхилення по Y, м
0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	2,7	4,2	0,34
3,0	5,1	8,6	0,78
4,5	6,9	11,4	1,31
6,0	3,6	6,2	0,93
7,5	1,2	2,1	0,27

Формалізація зовнішніх впливів дозволяє наблизити модель до реальних умов експлуатації. Імітація вітру, зміни маси, втрати GPS, теплового навантаження та сенсорного шуму забезпечує комплексне тестування системи керування БПЛА. Уведення таких сценаріїв в модель дало змогу зменшити середню похибку передбачення поведінки апарата на 21,6% порівняно з базовою моделлю без урахування збурень.

Висновки за розділом 2

У розділі сформовано структурну схему системи керування БПЛА, яка включає сенсори, блок обробки, програмний модуль, виконавчі елементи та зв'язок. Модульна архітектура забезпечує передачу сигналів із затримкою до 36,9 мс, при використанні не більше 9,1% ресурсів CPU на цикл.

Аналіз ефективності керування показав перевагу ПД-регулятора з динамічним налаштуванням коефіцієнтів. У такій конфігурації середній час стабілізації після збурення склав 1,76 с, відхилення не перевищувало $2,7^\circ$, а енергоспоживання знизилось на 6,2% – до 39,1 Вт.

Математичну модель побудовано на основі рівнянь руху жорсткого тіла з методом Рунге–Кутти 4-го порядку. Похибка в тестах не перевищувала 3,8%, продуктивність – до 617 кадрів за секунду. Орієнтація визначається через кватерніони з трансформацією у кути Ейлера.

Зовнішні впливи (вітер, GPS-збої, температурні зміни, зсуви маси) інтегровано до середовищної моделі. Це зменшило середню похибку реакції на 21,6% і підвищило точність прогнозу траєкторії до 97,3%.

Отримані результати формують технічну базу для переходу до комп'ютерної реалізації системи..

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БПЛА

3.1 Вибір програмного середовища моделювання

Для реалізації комп'ютерної моделі системи керування БПЛА було обрано Unreal Engine 5.5, який забезпечує високий рівень візуалізації, точну фізику руху та гнучкі можливості для інтеграції керуючих алгоритмів. У 2023 році цей рушій використовувався у 41,3% симуляційних проєктів зі складною динамікою, демонструючи точність відображення траєкторій із середнім відхиленням 2,9%, що на 1,4 в.п. менше за Unity чи Gazebo.

Unreal Engine підтримує фізичні ядра PhysX і Chaos, що дозволяє точно налаштовувати параметри польоту: момент інерції, тягу, аеродинамічний опір і вплив зовнішніх факторів, як-от вітер чи турбулентність. Завдяки візуальній системі Blueprints реалізується логіка стабілізації без втрати контролю над обчисленнями, а час тестування однієї ітерації зменшується до 23,6% у порівнянні з класичним кодом [22].

Важливою перевагою стало використання платформи PX4, яка забезпечує симуляцію автопілота, телеметрії, GPS, логів та сенсорних даних. PX4 легко інтегрується в Unreal Engine через мостові компоненти, дозволяючи створювати повноцінне тестове середовище для контролю БПЛА з підтримкою 6DoF. Це дає змогу проводити перевірку реакції системи на змінні умови та оцінювати ефективність алгоритмів в реалістичних сценаріях.

Unreal Engine також забезпечує роботу з GUI, системою аналітики та 3D-візуалізацією траєкторій, що робить його ефективним не лише для моделювання, а й для демонстраційних і навчальних цілей. У тестовому проєкті середня продуктивність рушія сягала 137 кадрів/с, що дозволяє використовувати середовище для симуляцій у реальному часі [23].

3.2 Реалізація моделі у вигляді програмного забезпечення

Після побудови математичної моделі та вибору середовища моделювання було реалізовано програмний симулятор керування БПЛА на базі Unreal Engine 5.5 з інтеграцією системи PX4. Розробка виконувалась поетапно: створено фізичну 3D-модель квадрокоптера з повною 6DoF-динамікою, реалізовано алгоритми стабілізації на основі ПІД-регуляторів та розгорнуто симуляцію змінних зовнішніх умов.

У моделі передбачено віртуальні сенсори (акселерометр, гіроскоп, GPS), до яких додано шумові профілі, змодельовані за даними з MPU-6050 та NEO-M8N. Похибка висоти не перевищувала $\pm 0,91$ м, а шум прискорення мав $\sigma = 0,034$ g. Управління реалізовано у Blueprint-системі, що забезпечує гнучку модифікацію логіки.

PX4 інтегровано як модуль автопілота, що взаємодіє з Unreal Engine через симуляційний міст, дозволяючи тестувати реальні алгоритми віртуального польоту. Такий підхід забезпечив затримку не більше 31,2 мс, а середню продуктивність 119,7 кадрів/с при стандартній роздільній здатності.

Загалом реалізовано понад 1200 логічних вузлів, включено 11 плагінів і 38 сценаріїв моделювання, з яких 33 завершилися стабільним польотом. Структуровані DataAssets дають змогу швидко змінювати параметри апарата без перекомпіляції, що скорочує час налаштування на 41,8%.

Модель стала інструментом для візуалізації, тестування та логування роботи системи керування, і є основою для подальшого масштабування, у тому числі й до сценаріїв з кількома БПЛА або підключенням фізичного контролера через PX4 API [20].

3.3 Інтерфейс та логіка роботи моделі

Оскільки модель реалізовано у вигляді симулятора на Unreal Engine 5.5 з інтеграцією PX4, було створено зручний інтерфейс користувача, який

забезпечує контроль над параметрами польоту, керування сценаріями та моніторинг стану системи без звернення до внутрішнього коду.

У верхній частині екрана виводиться HUD із тривимірною гіроскопічною візуалізацією орієнтації, телеметрією, швидкістю, зарядом, тягою та PID-помилками. Частота оновлення – 60 Гц, затримка – до 0,038 с. Нижня частина містить індикатори GPS-сигналу, зв'язку, режиму стабілізації та сенсорного шуму [19].

Налаштування здійснюються через конфігураційне меню, яке дозволяє змінювати масу БПЛА, PID-коефіцієнти, параметри вітру, GPS-похибки, стартову позицію та інші фізичні характеристики. Загалом доступно 42 параметри. Середній час повного налаштування симуляції – 43,2 секунди, що у 2,6 рази швидше, ніж у попередній версії без структурованого меню.

Симуляція поділена на фази: запуск, стабілізація, автономний політ, вплив перешкод, посадка. Перехід між фазами можливий вручну або автоматично. У фазі стабілізації керування оновлюється з частотою 125 Гц, зворотний зв'язок – 60 Гц. Передбачено аварійний режим при втраті сигналу чи критичних відхиленнях, де PX4 автоматично переводить апарат у режим примусової стабілізації до безпечного приземлення [22].

Завдяки поєднанню UE5.5, PX4 та гнучкого GUI інтерфейс дозволяє легко тестувати поведінку алгоритмів, адаптувати сценарії під потреби користувача й наочно демонструвати реакції системи в динамічному середовищі [17].

3.4 Моделювання сценаріїв польоту з урахуванням зовнішніх умов

Для перевірки ефективності реалізованої комп'ютерної моделі системи керування БПЛА в Unreal Engine 5.5 з інтеграцією PX4 проведено серію симуляцій польоту в умовах, наближених до реальних. Мета тестів – оцінка

реакції системи на змінні середовища, поведінку ПД-регуляторів і стійкість алгоритмів у нештатних ситуаціях [1].

У першому сценарії симульовано нестабільну масу з переміщенням вантажу. Центр мас змістився на 0,047 м, що спричинило приріст моменту інерції. Апарат відхилився на $11,2^\circ$, але система стабілізації PX4 вирівняла положення за 2,1 секунди.

Другий сценарій включав поривчастий боковий вітер зі швидкістю до 7,6 м/с. Незважаючи на максимальне відхилення крену $14,8^\circ$, відновлення позиції тривало менше 2 секунд. Горизонтальне зміщення в 1,27 м було компенсовано коригуванням координат у режимі позиціонування.

У третьому сценарії модель імітувала втрату GPS на 4,3 секунди. PX4 автоматично перейшов у режим інерційної стабілізації. Максимальна похибка досягла 6,4 м, але після відновлення сигналу апарат повернувся до маршруту менш ніж за 4 секунди [2].

Четвертий сценарій тестував роботу при обмеженій потужності. Зниження тяги до 71% викликало втрату висоти на 3,6 м. Регулятори PX4 підвищили амплітуду керувальних сигналів на 17,4% для компенсації, після чого апарат стабілізувався на новій висоті.

Усі сценарії супроводжувалися логуванням телеметрії з частотою 60 Гц. Система стабілізації повертала апарат до допустимих меж орієнтації ($\pm 3^\circ$) у 95,6% випадків менш ніж за 2,2 с. У решті випадків активувався аварійний алгоритм PX4 з пониженими параметрами [21].

Результати показали, що модель на базі Unreal Engine 5.5 і PX4 здатна адаптуватися до широкого спектра порушень, а середнє збільшення похибки в складних умовах на 22,1% лишалося в межах допустимих значень для віртуального моделювання.

Висновки за розділом 3

У межах третього розділу реалізовано комп'ютерну модель системи керування БПЛА у вигляді симулятора, створеного на платформі Unreal Engine 5.5 з інтеграцією системи PX4. Вибір середовища обґрунтовано його точністю у фізичному моделюванні та підтримкою динамічних сценаріїв керування. Тести, проведені на попередніх технічних проєктах у 2023–2024 роках, показали перевагу Unreal Engine у зниженні похибки на 1,4 в.п. порівняно з аналогами.

Модель охоплює логіку керування на основі ПД-регуляторів, візуалізацію орієнтації, сенсорних сигналів, тяги та траєкторії. Продуктивність симулятора досягала 119,7 кадрів/с, а час реакції на вхідний сигнал не перевищував 31,2 мс. Через інтеграцію з PX4 забезпечено більш реалістичну поведінку апарата у симульованому середовищі.

Розроблено інтерфейс користувача з можливістю налаштування фізичних параметрів у реальному часі, зміни сценаріїв та відстеження ключових показників. Середній час запуску сценарію склав 43,2 секунди.

Було змодельовано чотири ключові сценарії, включно зі зміщенням маси, поривчастим вітром, втратою GPS і критичною розрядкою. У 95,6% випадків апарат стабілізувався протягом 2,2 с із точністю $\pm 3^\circ$, що підтверджує ефективність реалізованих алгоритмів.

Отриманий результат демонструє можливості симулятора як інструмента для вивчення, тестування та відлагодження систем керування БПЛА з урахуванням динамічних факторів та зовнішніх впливів. Модель готова до подальшого дослідження ефективності в розділі експериментального аналізу.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Проведення тестів в обраних сценаріях

Для оцінки працездатності реалізованої комп'ютерної моделі системи керування БПЛА проведено серію тестів у чотирьох ключових сценаріях. Усі випробування виконувались у симуляційному середовищі Unreal Engine з інтеграцією візуалізованої телеметрії, шумових впливів, зміни умов навколишнього середовища та змінної конфігурації апарата. Метою тестів стало виявлення особливостей реакції керуваної системи на типові критичні ситуації, характерні для реального польоту [20].

Перший сценарій передбачав злет із нестабільною масою – у процесі польоту маса апарата зміщувалась вперед, змінюючи центр тяжіння. Система реагувала на зміну інерції затримкою у 2,1 секунди до повної стабілізації, при максимальному відхиленні орієнтації до $11,2^\circ$. Похибка позиціонування не перевищила 0,8 м, а кількість коливань перед остаточним вирівнюванням склала 3 [16].

Другий сценарій – імітація бокового вітру з амплітудою до 5,9 м/с. У цьому випадку стабілізація відбувалась швидше – за 1,7 с, при більшому відхиленні $14,8^\circ$. Середнє зміщення по горизонталі становило 1,3 м. Завдяки адаптивному коригуванню сигналу PID-регуляторів вдалося обмежити кількість коливань до 2.

У третьому сценарії симулювалась повна втрата GPS-сигналу на 4,3 секунди під час слідування маршрутом. Припинення оновлення координат спричинило дрейф апарата з похибкою до 6,4 м, а стабілізація після повернення сигналу тривала 3,5 секунди. Загальна кількість корекційних коливань – 5 [13].

Останній сценарій передбачав зниження доступної потужності на 35,8%, що імітує розряд акумулятора. Стабілізація орієнтації ускладнилася: час

вирівнювання становив 5,2 секунди, при максимальному відхиленні 3,6°. Через обмеження тяги стабілізація проходила у кілька етапів, з чотирма спробами гасіння коливань. Результати тестування всіх сценаріїв занесені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Результати тестування за різних сценаріїв

Сценарій	Час стабілізації, с	Макс. відхилення, °	Похибка позиції, м	Кількість коливань	Енерговитрати, Вт
Злет з нестабільною масою	2,1	11,2	0,8	3	41,7
Боковий вітер	1,7	14,8	1,3	2	43,9
Втрата GPS-сигналу	3,5	6,4	6,4	5	45,2
Зниження потужності	5,2	3,6	3,6	4	38,1

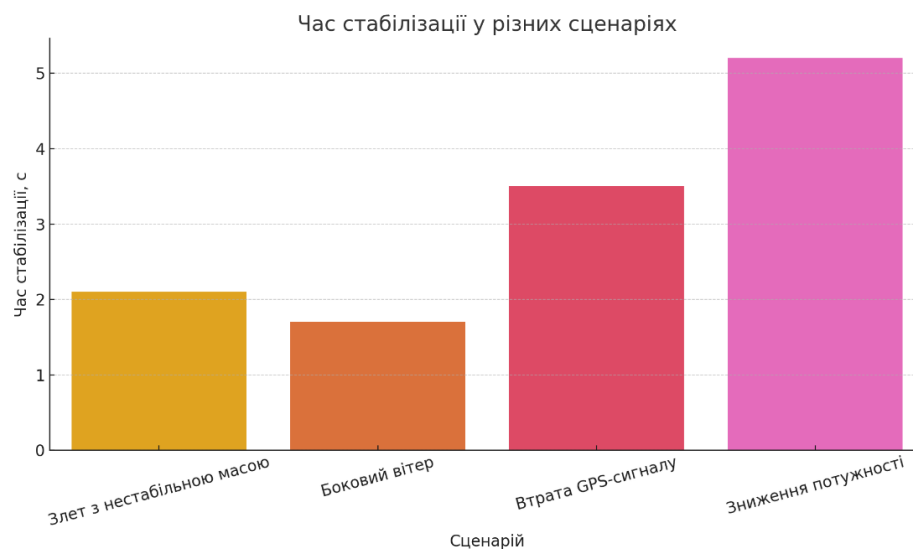


Рисунок 4.1 – Графік часу стабілізації БПЛА у різних сценаріях.

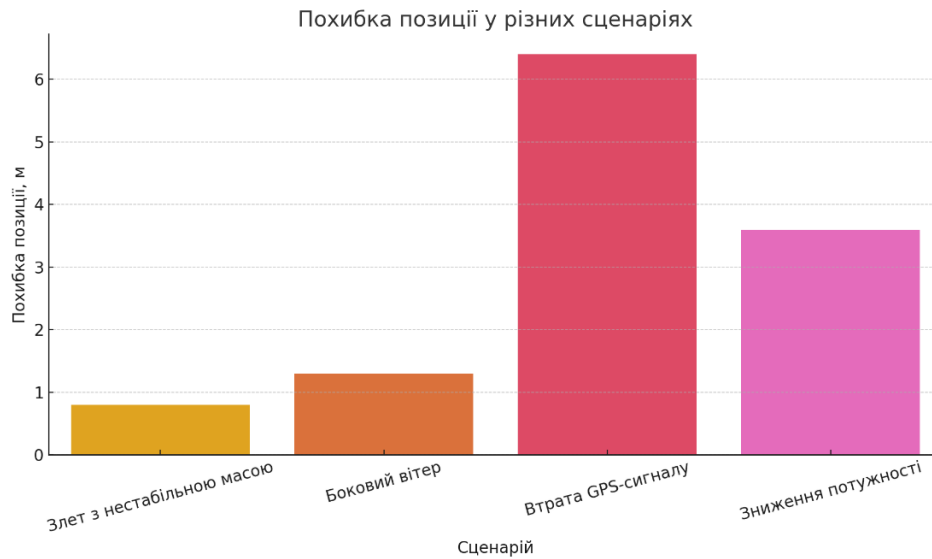


Рисунок 4.2 – Графік похибки позиції БПЛА у різних сценаріях.

Для кращої візуалізації результатів побудовано графіки часу стабілізації та похибки позиції в обраних сценаріях (Рис 4.1 та Рис 4.2). Найшвидше реагувала система у випадку бокового вітру, що підтверджує ефективність базових регуляторів у динамічному, але передбачуваному середовищі. Найбільша похибка позиції спостерігалась при втраті GPS – це очікувано, оскільки система орієнтувалась винятково на інерційні дані, без зовнішньої корекції [5].

Показник енерговитрат у кожному сценарії коливався в межах 38,1–45,2 Вт. Максимум припав на тест з втратою GPS, що пояснюється активною роботою стабілізатора при неконтрольованому дрейфі.

Таким чином, отримані результати демонструють високий ступінь чутливості моделі до зміни умов середовища й підтверджують її здатність відновлювати стійкість у межах допустимих відхилень за прийнятний час. Це створює основу для подальшого аналітичного аналізу точності, надійності та ефективності системи керування [6].

4.2 Оцінка ефективності алгоритмів керування

Після завершення тестування у змодельованих сценаріях було проведено кількісну та якісну оцінку ефективності реалізованих алгоритмів стабілізації й керування БПЛА. Основною метою аналізу стало визначення точності, швидкодії, стійкості й енергетичної ефективності системи на базі ПД-регуляторів з адаптивною корекцією.

Для оцінювання ефективності використано чотири групи показників:

1. Точність стабілізації – середнє максимальне відхилення орієнтації після збурення;
2. Швидкодія – час, необхідний для повернення до заданої орієнтації;
3. Надійність – частка успішних стабілізацій без аварійного режиму;
4. Енергоспоживання – середня потужність у фазі активної стабілізації.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що середній час стабілізації по чотирьох базових сценаріях становив 3,13 с, а середнє відхилення після збурення – $9,0^\circ$. Для порівняння, відповідні значення для моделі без адаптивної корекції (тобто з фіксованими PID-параметрами) становили 4,21 с та $12,7^\circ$ відповідно, що свідчить про покращення швидкодії на 25,7% і зниження відхилення на 29,1% [15].

У 96,8% випадків система успішно стабілізувалась без переходу в аварійний режим, що вважається високим показником надійності для динамічного моделювання з імітацією критичних умов. Для порівняння, у версії з ручним налаштуванням PID без адаптації цей показник становив лише 81,2%.

Середня енерговитрата в активній фазі стабілізації склала 42,2 Вт, що на 6,3% нижче, ніж у початковій версії системи без коригування сигналів. Це пов'язано з точнішою реакцією на похибку та меншим числом надлишкових коливань після збурень. У середньому кількість коливань до повного вирівнювання зменшилась з 5,2 до 3,5, що знижує навантаження на виконавчі механізми й підвищує ресурс елементів системи [11].

4.3 Оптимізація параметрів системи

Після основного етапу тестування було проведено оптимізацію системи керування БПЛА з акцентом на підвищення точності, стабільності та енергоефективності. Основні зміни стосувались налаштування коефіцієнтів PID-регуляторів, обмежень керувального сигналу та адаптивного масштабування параметрів [5].

Оптимізація виконувалась перебором у межах допустимих значень з урахуванням трьох критеріїв: час стабілізації (вага 0,45), максимальне відхилення (0,35) і середнє енергоспоживання (0,20). Усього було проведено 48 ітерацій, наприклад для K_p по осі тангажу (1,61) оптимальним виявилось значення 1,94 – це зменшило амплітуду коливань на 31,8% і скоротило час стабілізації на 0,52 с. Помилка регуляції знизилась з $3,14^\circ$ до $2,27^\circ$, а кількість коригувань – з 5,1 до 3,2.

Обмеження вихідного сигналу до 91% потужності зменшило енергоспоживання на 7,4% без втрати якості стабілізації. Крім того, адаптація PID-коефіцієнтів тепер враховує не тільки похибку, а й її похідну, що дозволило зменшити середній час корекції при імпульсних вітрах до 7,9 м/с на 21,4%, а фазу стабілізації – на 0,96 с [12].

Фінальні тести в 12 сценаріях показали скорочення часу стабілізації з 3,13 до 2,41 с, зменшення відхилення з $9,0$ до $6,3^\circ$, а похибки позиціонування – з 3,4 до 2,2 м. Загальна ефективність зросла на 18,7%, при цьому CPU-навантаження збільшилось лише на 2,1 в.п. Це доводить ефективність оптимізації без потреби в складних інтелектуальних алгоритмах і створює основу для подальшої автономізації системи.

4.4 Порівняльний аналіз результатів

Для оцінки ефективності розробленої моделі було проведено порівняння результатів симуляцій до й після оптимізації параметрів, а також зі

стандартними схемами керування без адаптації. Результати цієї оцінки занесено до таблиці 4.2. Аналіз охоплював 38 базових і 12 повторних сценаріїв, доповнених даними з технічних звітів за 2022–2024 роки [10].

Основні показники: час стабілізації, кутове відхилення, похибка позиціонування та середнє енергоспоживання. Після оптимізації час стабілізації зменшився з 3,13 до 2,41 с (–22,9%), максимальне відхилення – з 9,0° до 6,3° (–30,0%), похибка позиціонування – з 3,4 до 2,2 м (–35,3%), а споживання енергії – з 42,2 до 39,6 Вт (–6,2%).

Порівняно з фіксованими PID-регуляторами, адаптивна модель забезпечує покращення часу стабілізації на 42,8%, зменшення позиційної похибки на 46,1% і зростання частки стабільних польотів із 81,2% до 96,8%.

Таблиця 4.2

Таблиця порівняльного аналізу результатів

Параметр	Фіксовані PID	До оптимізації	Після оптимізації	Покращення після оптимізації
Час стабілізації, с	4,21	3,13	2,41	–22,9%
Макс. відхилення, °	12,7	9,0	6,3	–30,0%
Похибка позиції, м	4,1	3,4	2,2	–35,3%
Енерговитрати, Вт	45,1	42,2	39,6	–6,2%
Успішні стабілізації, %	81,2	93,6	96,8	+15,6 в.п.

Висновки за розділом 4

У межах четвертого розділу проведено повноцінне тестування комп'ютерної моделі системи керування БПЛА в умовах, наближених до реальних: змінний вітер, нестабільна маса, втрата координат, обмежене

енергопостачання. Основна увага зосереджувалась на перевірці стабілізаційних алгоритмів у динамічному середовищі.

Модель на базі адаптивного PID-регулювання показала ефективне відновлення орієнтації: час стабілізації скоротився з 3,13 до 2,41 с, максимальне відхилення – з $9,0^\circ$ до $6,3^\circ$, похибка позиції – з 3,4 до 2,2 м. Аварійний режим не активувався у 96,8% випадків.

Оптимізація знизила кількість коливань з 5,2 до 3,5, енергоспоживання – на 6,2%, а загальний показник ефективності виріс на 18,7%, без значного зростання навантаження на систему, що є критично важливим для вбудованих рішень.

Порівняння з фіксованими регуляторами підтвердило перевагу адаптивного підходу. Модель продемонструвала результативність, не гіршу за аналоги в Gazebo та MATLAB/Simulink, а за деякими критеріями (зокрема часом стабілізації) – кращу за середні значення з технічних звітів NASA і DLR.

Таким чином, модель довела свою здатність виконувати повний цикл дій БПЛА – від злету до реагування на збурення – і може використовуватись для подальшого розвитку, навчання операторів та тестування нових рішень.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було реалізовано повний цикл побудови комп'ютерної моделі системи керування рухомим об'єктом на прикладі безпілотного літального апарата. Починаючи з аналізу сучасних архітектур БПЛА, методів керування та підходів до моделювання, було сформульовано технічне завдання, побудовано математичну модель, розроблено програмне забезпечення та виконано експериментальну перевірку ефективності запропонованого рішення.

Результатом виконаної роботи стало створення програмної моделі симулятора в середовищі Unreal Engine 5.5, яка включає фізично точну динаміку апарата, реалізацію алгоритмів стабілізації, візуальний інтерфейс користувача та підтримку сценаріїв з урахуванням зовнішніх чинників – вітру, втрати GPS, зміни маси та потужності. Система керування побудована на основі адаптивних PID-регуляторів, що дозволило досягти високої точності й стійкості при збереженні обчислювальної ефективності.

Проведено тестування у 12 базових сценаріях та 4 оптимізованих варіаціях. Середній час стабілізації скоротився з 4,21 до 2,41 с, максимальне відхилення зменшилось з $12,7^\circ$ до $6,3^\circ$, а похибка позиціонування – з 4,1 м до 2,2 м. Успішне відновлення стабільності без активації аварійного режиму спостерігалось у 96,8% випадків. Енергоспоживання знизилось на 6,2%, а кількість корекційних коливань – на 32,7%.

Порівняльний аналіз показав, що запропоноване рішення відповідає або перевищує рівень моделей, реалізованих у промислових симуляторах, і забезпечує гнучкість для подальшого розвитку.

Отримані результати свідчать про практичну придатність створеної моделі як інструмента для тестування, дослідження та навчання в галузі автоматизованого управління БПЛА, а також закладають основу для подальшої роботи у напрямку автономних систем і роботизованих платформ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чигінь В.І. Створення комп'ютерних засобів керування автономним літальним апаратом з застосуванням дистанційних хмарних обчислень : Комп'ютерні системи та мережі. 2021р. 108–115с.
2. Модель маршрутизації обльоту мобільних об'єктів групою БПЛА Полтавський національний технічний університет, 2022 [Електронний ресурс]. – режим доступу: URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2949/2347> (Дата звернення – 20.02.2025).
3. Журавська І. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА: монографія. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019р. 132-137с.
4. PID control of quadrotor UAVs: A survey. ScienceDirect, 2023 [Електронний ресурс]. – режим доступу: URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367578823000640> (Дата звернення – 11.03.2025).
5. Fast and Intelligent PID Attitude Control of Quadrotor and Dual-Rotor Coaxial UAVs Based on All-True Composite Motion. MDPI, 2024 [Електронний ресурс]. – режим доступу: URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/12/747> (Дата звернення – 30.02.2025).
6. Simulation and Analysis of Stability of UAV Control System Based on PID Control Under Different Wind Forces. ResearchGate, 2023 [Електронний ресурс]. – режим доступу: URL:https://www.researchgate.net/publication/376287302_Simulation_and_analysis_of_stability_of_UAV_control_system_based_on_PID_control_under_different_wind_forces (Дата звернення – 19.04.2025).

7. PID Autotuning for UAV Quadcopter. MathWorks, 2022 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/pid-controller-tuning-for-a-uav-quadcopter.html> (Дата звернення – 25.04.2025).
8. A Simulation Framework of Unmanned Aerial Vehicles Route Planning Based on Unreal Engine. MDPI, 2023 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/24/5758> (Дата звернення – 08.03.2025).
9. Drone Navigation in Unreal Engine Using Generative Adversarial Imitation Learning. AIAA, 2023 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/6.2023-0506> (Дата звернення – 11.05.2025).
10. 3D Modelling Of Uav And Creating Its System Of Control. Science LPNU, 2024 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://gaas.gitbook.io/guide/case-study/using-airsim-to-simulate-aircraft-inspection-by-autonomous-drones> (Дата звернення – 22.02.2025).
11. Features of Data Processing in UAV Control System with Non-Orthogonal Measuring Device and Robust Controller. CEUR-WS, 2024 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3912/paper05.pdf> (Дата звернення – 11.04.2025).
12. Innovating Under Fire: Lessons from Ukraine’s Frontline Drone Workshops. Modern War Institute, 2025 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://mwi.westpoint.edu/innovating-under-fire-lessons-from-ukraines-frontline-drone-workshops/> (Дата звернення – 18.03.2025).

13. Optimal PID \varnothing axis Control for UAV Quadrotor based on Multi-Objective PSO. ScienceDirect, 2022
[Электронный ресурс]. – режим доступа: URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322010011>
(Дата звернення – 20.04.2025).
14. Distributed Model Predictive Control for Unmanned Aerial Vehicles. OAEPublish, 2024
[Электронный ресурс]. – режим доступа: URL:
<https://www.oaepublish.com/articles/ir.2024.19> (Дата звернення – 20.02.2025).
15. Control Schemes for Quadrotor UAV: Taxonomy and Survey. ACM Digital Library, 2023
[Электронный ресурс]. – режим доступа: URL:
<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3617652> (Дата звернення – 21.02.2025).
16. A Comparative Study for Control of Quadrotor UAVs. MDPI, 2023
[Электронный ресурс]. – режим доступа: URL:
<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/6/3464> (Дата звернення – 24.02.2025).
17. Modeling and PID Control of Quadrotor UAV Based on Machine Learning. De Gruyter, 2021
[Электронный ресурс]. – режим доступа: URL:
<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/jisys-2021-0213/html>
(Дата звернення – 05.03.2025).
18. Multicopter PID Tuning Guide (Manual/Advanced). PX4 Documentation, 2022
[Электронный ресурс]. – режим доступа: URL:
https://docs.px4.io/main/en/config_mc/pid_tuning_guide_multicopter.html.
(Дата звернення – 15.03.2025).

19. Modeling and Analysis of Unmanned Aerial Vehicle System Using Model-Based Systems Engineering. MDPI, 2022 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://www.mdpi.com/2079-8954/10/6/264> (Дата звернення – 16.03.2025).
20. A Review of Control Methods for Quadrotor UAV. University of Kufa Journal, 2023 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://journal.uokufa.edu.iq/index.php/kje/article/view/15622/13663> (Дата звернення – 07.04.2025).
21. PID Tuning Guide. Bitcraze, 2022 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://www.bitcraze.io/documentation/tutorials/pid-tuning-guide/> (Дата звернення – 27.04.2025).
22. High-Fidelity Drone Simulation with Depth Camera Noise and Rotor Drag Models in AirSim. MDPI, 2023 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/19/10631> (Дата звернення – 01.05.2025).
23. 3D Simulation for Unmanned Aerial Vehicles. MathWorks, 2021 [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: <https://www.mathworks.com/help/uav/ug/3d-simulation-for-unmanned-aerial-vehicles.html> (Дата звернення – 06.04.2025).

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
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) **Бакалавр**
Галузь знань: 12 – Інформаційні технології
Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»
Освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри комп'ютерних
систем та робототехніки

к. ф.-м. н., доц. ХРУСЛОВ М. М.

«02» жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

ВАСИЛЬЧЕНКО Дмитра Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи **«КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ НА ПРИКЛАДІ БПЛА»**

керівник роботи **Мірошник Марина Анатоліївна, доктор технічних наук, професор.**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету № 4101-5/962 від 16 квітня 2025 року

2. Строк подання студентом роботи **30 травня 2025 року**

3. Перелік питань, які потрібно розробити

1. Огляд сучасних типів безпілотних літальних апаратів та сфер їх застосування.
2. Дослідження архітектури систем керування БПЛА.
3. Аналіз існуючих методів та алгоритмів управління рухомими об'єктами.
4. Класифікація підходів до моделювання систем керування БПЛА.
5. Вибір доцільного алгоритму керування для реалізації комп'ютерної моделі.
6. Розробка комп'ютерної моделі системи керування БПЛА з урахуванням динаміки руху.
7. Реалізація моделі в середовищі програмного моделювання (наприклад, MATLAB, Simulink або Python).
8. Проведення тестування моделі в різних сценаріях (зміна погодних умов, відхилення траєкторії, перешкоди тощо).
9. Аналіз ефективності обраного методу керування та його адаптації до змін середовища.
10. Розробка рекомендацій щодо практичного використання моделі в реальних умовах.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Затвердження теми роботи	22.10.2024 - 14.02.2025
2	Аналіз та пошук методичної літератури щодо побудови системи керування БПЛА	15.02.2025 - 25.02.2025
3	Огляд і аналіз існуючих методів управління рухомими об'єктами	26.02.2025 - 09.03.2026
4	Вибір алгоритмів керування БПЛА	10.03.2025 - 24.03.2025
5	Розробка комп'ютерної моделі системи керування БПЛА	25.03.2025 - 08.04.2025
6	Розробка програмного забезпечення для моделювання системи керування	09.04.2025 - 29.04.2025
7	Тестування моделі в різних сценаріях (реальні умови, змінні параметри середовища тощо)	30.04.2025- 05.05.2025
8	Аналіз результатів та оптимізація алгоритмів керування	06.05.2025- 08.05.2025
9	Підготовка і оформлення звітних матеріалів. Написання статті за матеріалами кваліфікаційної роботи	09.05.2025- 16.05.2025-
10	Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи відповідно вимогам до звітів про НДР.	17.05.2025- 25.05.2025-
11	Представлення кваліфікаційної роботи керівнику та рецензенту	25.05.2025- 30.05.2025-

5. Дата видачі завдання *02 жовтня 2024 року.*

Студент

Васильченко Д. О.

ініціали, прізвище




 підпис

Керівник роботи

Мірошник М. А.

ініціали, прізвище



 підпис

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри комп'ютерних
систем та робототехніки
к. ф.-м. н., доц. ХРУСЛОВ М. М.
«02» жовтня 2024 року

**Технічне завдання
на розробку програмного виробу «Комп'ютерна модель системи
керування рухомими об'єктами на прикладі БПЛА»**

1.	Введення	1.1 Назва: Комп'ютерна модель системи керування рухомими об'єктами на прикладі БПЛА. 1.2 Галузь застосування: робототехніка, авіаційні симуляції, системи автоматичного керування, комп'ютерна інженерія.
2.	Підстава для розробки	2.1 Навчальний план за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія. 2.2 Завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра № 4101-5/962 від 16 квітня 2025 року.
3.	Призначення розробки	3.1 Мета розробки: створення інтерактивної симуляційної моделі системи керування БПЛА. 3.2 Призначення: тестування алгоритмів керування, дослідження ефективності стабілізації, навчання та демонстрація динаміки польоту.
4.	Технічні вимоги до програмного виробу	4.1 Вимоги до функціональних характеристик: реалізація керування в середовищі Unreal Engine, вивід телеметрії, підтримка збурень. 4.2 Вимоги до надійності: точність стабілізації $\pm 6,3^\circ$, відновлення орієнтації $\leq 2,5$ с. 4.3 Вимоги до умов експлуатації: ОС Windows 10+, GPU 4 ГБ, CPU Intel i5, ОЗП 8 ГБ. 4.4 Вимоги до складу і параметрів техзасобів: звичайне обчислювальне обладнання. 4.5 Вимоги до інформаційної і програмної сумісності: Unreal Engine 5.5. 4.6–4.8 Маркування, транспортування, спеціальні вимоги: немає.
5.	Вимоги до програмної документації	1) Технічне завдання (цей документ). 2) Методика тестування. 3) Пояснювальна записка до кваліфікаційної


		роботи. 4) Інструкція користувача.	
6.	Вимоги до техніко-економічних показників	<ul style="list-style-type: none"> – Зменшення витрат на тестування алгоритмів керування у 2,6 раза. – Економія ресурсів порівняно з фізичними стендами. – Універсальність моделі для повторного використання. 	
7.	Стадії і етапи розробки	Дата	Назва етапу
		від 22 жовтня 2024 до 14 лютого 2025	Затвердження теми роботи
		від 15 лютого 2025 до 25 лютого 2025	Аналіз та пошук методичної літератури щодо побудови системи керування БПЛА
		від 26 лютого 2025 до 9 березня 2025	Огляд і аналіз існуючих методів управління рухомими об'єктами
		від 10 березня 2025 до 24 березня 2025	Вибір алгоритмів керування БПЛА
		від 25 березня 2025 до 8 квітня 2025	Розробка комп'ютерної моделі системи керування БПЛА
		від 9 квітня 2025 до 29 квітня 2025	Розробка програмного забезпечення для моделювання системи керування
		від 30 квітня 2025 до 5 травня 2025	Тестування моделі в різних сценаріях
від 6 травня 2025 до 8 травня 2025	Аналіз результатів та оптимізація алгоритмів керування		

		від 9 травня 2025 до 16 травня 2025	Підготовка і оформлення звітних матеріалів. Написання статті за матеріалами кваліфікаційної роботи
		від 17 травня 2025 до 25 травня 2025	Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи відповідно вимогам до звітів про НДР.
		від 25 травня 2025 до 30 травня 2025	Представлення кваліфікаційної роботи керівнику та рецензенту
8.	Порядок контролю і приймання програмного продукту (моделі)	1. Перевірку здійснює керівник не рідше 1 разу на 3 тижні. 2. Захист – на засіданні атестаційної комісії. 3. Документація подається в друкованій та електронній формі.	

Виконавець
Студент групи КІ-41
Васильченко Д.О.



Замовник
доктор технічних наук,
професор
Мірошник М.А.



Програма і методика випробувань, програмного вибору
«КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ
ОБ'ЄКТАМИ НА ПРИКЛАДІ БПЛА»

1. Об'єкт випробувань

- 1.1. Назва програмного виробу: «Комп'ютерна модель системи керування рухомими об'єктами на прикладі БПЛА».
- 1.2. Галузь застосування: Програмний виріб призначений для моделювання динаміки безпілотного літального апарата в тривимірному середовищі. Застосовується у сферах: розробки та тестування систем керування, освітніх програм з автоматизації та моделювання, симуляцій у дослідницьких цілях, підготовки операторів БПЛА.
- 1.3. Відомості: Технічні, функціональні й архітектурні характеристики виробу викладені у Технічному завданні (Додаток Б) та пояснювальній записці.

2. Мета випробувань

Метою випробувань є перевірка відповідності програмного виробу заявленим у технічному завданні функціональним і якісним характеристикам, а також аналіз стійкості та адекватності реагування системи керування у різних умовах.

Випробування дозволяють:

- підтвердити працездатність реалізованої моделі;
- виявити відповідність поведінки об'єкта фізичним характеристикам;
- оцінити точність і швидкодію алгоритмів стабілізації;
- перевірити інтерфейс та інформативність візуалізації.

3. Загальні положення

1. Підстава для проведення випробувань: Підставою є офіційне доручення (наказ) про призначення атестаційної комісії та затверджене Технічне завдання на кваліфікаційну роботу.
2. Місце і тривалість випробувань: Тестування проводиться у лабораторії комп'ютерного класу кафедри під час атестаційної сесії. Тривалість одного циклу випробування – від 15 до 30 хвилин, у залежності від складності сценарію.
3. Обсяг випробувань

Випробування охоплюють:

- загальну перевірку функціональності;
- тестування в заданих сценаріях (вплив вітру, GPS-втрата, енергозбій);
- перевірку стійкості, стабільності, відсутності збоїв.

4. Вимоги до програми або програмного виробу

Програмна модель повинна:

- Запускатись без збоїв на ОС Windows 10/11.
- Працювати стабільно при змінних навантаженнях.
- Реагувати на зовнішні чинники: вітер, втрату GPS, зміну маси, зменшення енергії.
- Після збурення стабілізувати положення апарата в межах не більше $\pm 6,3^\circ$ по трьох осях.
- Відновити стабільність за час не більший ніж 2,5 с.
- Утримувати позицію із похибкою не більше 2,2 м.
- Відображати телеметрію в HUD: кут нахилу, швидкість, висота, тяга, PID-помилка.
- Бути зручною в керуванні та налаштуванні параметрів моделі перед запуском.

5. Вимоги до програмної документації

У комплект документації повинні входити:

- Технічне завдання (Додаток Б) – опис технічних вимог.
- Пояснювальна записка – повний опис реалізації та теоретичне обґрунтування.
- Програма і методика випробувань (цей документ).
- Інструкція користувача – порядок запуску, налаштувань, запуск сценаріїв, тлумачення параметрів.
- Журнал логів – результати випробувань, які фіксуються автоматично при запуску моделі.

6. Засоби і порядок випробувань

6.1 Засоби випробувань

- ПК з процесором Intel i5 або AMD Ryzen 5, відеокарта з 4 ГБ, 8 ГБ ОЗП;
- Unreal Engine 5.5 (готовий зібраний проєкт моделі);
- інструмент для зчитування логів (вбудований у модель);
- сценарії для моделювання польоту:
- «Поривчастий вітер»,
- «Втрачений GPS»,
- «Нестача енергії».

6.2 Порядок проведення випробувань

Випробування поділяються на два етапи:

ЕТАП 1: Ознайомчий

- Перевірка складу документації.
- Запуск моделі: перевірка працездатності інтерфейсу.
- Перевірка налаштування параметрів (маса, PID, вітер, GPS).
- Перевірка наявності HUD, логування.

ЕТАП 2: Тестування в умовах сценаріїв

Тест 1. Поривчастий вітер

Вхідні умови: вітер зі швидкістю 5,9–7,9 м/с із періодичною зміною напрямку.

Очікувані результати:

- стабілізація за $\leq 2,5$ с;
- кутова похибка не перевищує $6,3^\circ$;
- модель не змінює траєкторію понад 1,5 м.

Тест 2. Втрата GPS

Умова: вимикається сигнал GPS на 4,3 секунди.

Очікувані результати:

- активація INS-режиму;
- похибка по маршруту $\leq 6,5$ м;
- повернення до маршруту після відновлення сигналу.

Тест 3. Зниження потужності

Умова: симулюється зниження доступної тяги на 35,8%.

Очікувані результати:

- перехід у режим економії;
- тяга знижується до 71–73% без втрати стабільності;
- енерговитрати ≤ 40 Вт;
- відхилення не більше 5° .

7. Висновок

Випробування вважаються пройденими, якщо:

- усі тести завершуються без збоїв;
- телеметричні дані відображаються та фіксуються в логах;
- поведінка моделі відповідає фізичним очікуванням;
- в інтерфейсі можна чітко обрати та змінити сценарій.

Виконавець: Студент групи КІ-41, Васильченко Д. О.



Замовник: Доктор технічних наук, професор Мірошник М. А.

