

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) Конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
Нарисної геометрії, комп'ютерної
графіки та дизайну
(назва кафедри)

Сергій ПИЛИПАКА

(підпис) (ПІБ)

— ” — 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА КЕРУВАННЯ
ДРОНОМ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Володимир БУЛГАКОВ
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Сергій ПИЛИПАКА
(ПІБ)

к.т.н.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Андрій НЕСВІДОМІН
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Задорожній Дмитро Вікторович

(ПІБ студента)

Додаток Д

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) Конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Нарисної геометрії, комп'ютерної
графіки та дизайну

Д.Т.Н., професор _____ Сергій ПИЛИПАКА
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)

— ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Задорожнього Дмитра Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) **РОЗРОБКА
ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА КЕРУВАННЯ ДРОНОМ**

затверджена наказом ректора НУБіП України від «16» грудня 2024 р. №2265 «С»

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 2025 червня 15

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)

Технологічна схема дрона

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих симуляторів та дронів
2. Розглянути перспективи розробки віртуального симулятора
3. Розробити середовище симулятора та здійснити тестування
4. Розглянути питання охорони праці при роботі симулятора
5. Виконати розрахунок економічної ефективності

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вигляд

Дата видачі завдання «16» грудня 2024 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

_____ Сергій ПИЛИПАКА
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Андрій НЕСВІДОМІН
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

_____ Дмитро ЗАДОРОЖНІЙ
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
РЕФЕРАТ	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД	8
1.1. Актуальність розробки	8
1.2. Загальні відомості симуляторів	9
1.3. Вибір симулятора	12
1.4. Загальні відомості дронів	13
1.5. Вибір дрона	16
1.6. Постановка задачі дослідження	17
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ	18
2.1. Математичне моделювання динаміки польоту дрона	18
2.2. Програмна реалізація симулятора у Unity	23
2.3. Розробка серидовища	27
2.4. Розробка інтерфейсу користувача	38
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	42
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	46
4.1. Економічний ефект	46
4.2. Окупність за один рік	47
ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ							
Розроб.		Задорожній Д.								Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Несвідомін А.								4		
Н. Контр.										НУБіП України		
Затверд.												

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки на 51 аркушах друкованого тексту, містить 4 розділи, висновки, список використаних джерел із 16 найменувань, 33 рисунка, 2 таблиць.

У першому розділі розглянуто загальні відомості про види симуляторів для використання керуванням дронів та види дронів. Обґрунтовано вибір віртуального симулятора та дрона.

Другий розділ присвячено розробці загального вигляду симулятора, його робота та робота дрона в ньому.

У третьому розділі розглянуто питання охорони праці при навчанні керування дроном у реальних і віртуальних умовах, визначено основні вимоги до безпеки, можливі ризики та заходи їх мінімізації, а також правила технічного обслуговування і ремонту.

Четвертий розділ містить розрахунок економічної ефективності навчання керування дроном. Проведено аналіз витрат на матеріали, навчання, обслуговування та страхування. Оцінено економічну доцільність проекту, що підтверджує його фінансову привабливість і конкурентоспроможність.

Ключові слова:

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Задорожній Д.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Несвідомін А.				5	
Н. Контр.					РЕФЕРАТ НУБіП України		
Затверд.							

ВСТУП

У XXI столітті аграрний сектор переживає справжню технологічну трансформацію, що зумовлена глобальними викликами: зміною клімату, зростанням потреб у продовольстві, нестачею трудових ресурсів та необхідністю підвищення ефективності використання земельних ресурсів. Відповіддю на ці виклики є впровадження концепції «точного землеробства», яка базується на широкому застосуванні інформаційних технологій, зокрема — безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів.

Дрони у сільському господарстві відіграють дедалі важливішу роль. Вони дозволяють аграріям оперативно отримувати точні дані про стан посівів, виявляти зони стресу рослин, моніторити зрошення, здійснювати аерофотозйомку та навіть проводити обприскування. Це не лише підвищує врожайність, а й знижує витрати на паливо, добрива та робочу силу.

В умовах сьогодення, коли Україна перебуває у стані повномасштабної війни, питання ефективного, раціонального та безпечного ведення аграрного виробництва набуває особливої важливості. Дрони стають незамінним інструментом для фермерів, особливо у регіонах, що наближені до зони бойових дій, де доступ до полів обмежений або небезпечний. Завдяки безпілотникам аграрії можуть здійснювати моніторинг територій на відстані, виявляти пошкоджені посіви, оцінювати стан ґрунтів і планувати посівні чи збиральні роботи з мінімальним ризиком для людей. Крім того, дрони допомагають оптимізувати використання ресурсів у складних економічних умовах, що є надзвичайно важливим для забезпечення продовольчої безпеки країни.

У цьому контексті розробка віртуального симулятора керування дроном є особливо актуальною. Такий інструмент дозволяє створити безпечне, адаптивне та економічно вигідне середовище для навчання

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Задорожній Д.			ВСТУП	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		Несвідомін А.					6	
<i>Н. Контр.</i>						НУБіП України		
<i>Затверд.</i>								

операторів без ризику пошкодження техніки чи негативного впливу на навколишнє середовище. Крім того, симулятор може враховувати специфіку аграрного ландшафту, моделювати польоти над полями різної конфігурації, із застосуванням змінних параметрів вітру, рельєфу та рослинності.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка функціонального віртуального симулятора керування дроном, орієнтованого на аграрні завдання. Проект буде реалізовано з використанням сучасних засобів програмування та графіки, зокрема ігрових рушіїв для моделювання фізики польоту, а також інтерактивного інтерфейсу користувача. У перспективі розроблений симулятор може бути інтегрований із реальними апаратами за допомогою систем телеметрії, що дозволить застосовувати його не лише для навчання, а й для тестування алгоритмів автономного керування чи оптимізації маршрутів польоту над сільськогосподарськими угіддями.

Таким чином, дана робота поєднує в собі програмну інженерію, віртуальну реальність та аграрні технології, пропонуючи ефективне рішення для цифрової трансформації агросектору України в умовах як воєнного стану, так і майбутнього відновлення.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Актуальність розробки

Розробка віртуальних симуляторів керування дронами набуває особливої актуальності, адже такі системи забезпечують ефективно та безпечно навчання операторів, а також створюють умови для моделювання сценаріїв, які складно або неможливо реалізувати в реальному середовищі. Це має значне значення як для цивільного застосування безпілотників — у сфері сільського господарства, картографії, моніторингу інфраструктури, — так і для підготовки військових фахівців.

Ключові переваги:

1. *Підвищення ефективності навчання:* Симулятори дозволяють оператору тренуватися у керуванні дроном без ризику пошкодження техніки або загрози для людей, що сприяє швидкому засвоєнню навичок.

2. *Забезпечення безпеки:* Віртуальне середовище є повністю контрольованим і не несе реальних загроз, що особливо важливо для початківців.

3. *Скорочення витрат:* Навчання на симуляторі не потребує витрат на паливо, амортизацію техніки та технічне обслуговування, що знижує загальні витрати на підготовку.

4. *Моделювання складних умов:* Симулятори здатні імітувати широкий спектр реалістичних ситуацій, що дозволяє готувати операторів до різних викликів у реальному середовищі.

5. *Індивідуалізація навчального процесу:* Тренування може бути адаптовано до конкретного користувача, що сприяє гнучкості та ефективності засвоєння знань.

Застосування у різних галузях:

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Задорожній Д.			РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Несвідомін А.						8	
Н. Контр.					НУБіП України				
Затверд.									

1. *Цивільна сфера:* У таких галузях, як аграрний сектор, будівництво, енергетика, екологія та картографія, симулятори допомагають опанувати техніку управління дроном, покращити продуктивність і знизити ризики.

2. *Військова підготовка:* За допомогою симуляторів військові оператори можуть відпрацьовувати стратегії та тактики, що підвищує рівень їхньої підготовки до бойових завдань.

3. *Наукові дослідження та інновації:* Віртуальні середовища дозволяють експериментувати з новими алгоритмами керування та системами автономної навігації, сприяючи технологічному прогресу.

Актуальність для України: У контексті повномасштабної війни та зростаючого значення безпілотників як у військовій, так і в цивільній сферах, розробка сучасних симуляторів керування дронами є вкрай важливою для України. Такі інструменти можуть значно пришвидшити підготовку операторів, зменшити витрати на навчання та зміцнити як обороноздатність країни, так і ефективність технологічного розвитку в аграрному та промисловому секторах.

1.2. Загальні відомості симуляторів

Симулятори — це спеціалізовані програмні або програмно-апаратні системи, призначені для моделювання реальної поведінки об'єктів або процесів у віртуальному середовищі. У сфері керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) симулятори виконують важливу роль у навчанні, підготовці операторів та тестуванні сценаріїв без необхідності запуску справжніх дронів.

Основна перевага використання симуляторів полягає у можливості безпечного, економічно вигідного та багаторазового відпрацювання польотних завдань. Особливо це важливо в умовах, коли використання реального дрона є ризикованим, вартісним або технічно неможливим.

					Арк.
					9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ

Принцип роботи симуляторів дронів

Сучасні симулятори імітують основні елементи керування дроном: нахили (roll, pitch), повороти (yaw) та контроль висоти (throttle). Реалізована фізична модель відтворює реакцію дрона на зміну тяги пропелерів, враховуючи інерцію, вітер, опір повітря, вплив маси й гравітації. Користувач взаємодіє з симулятором через пульт, контролер або клавіатуру — імітуючи умови реального польоту.

Класифікація симуляторів за призначенням:

1. Навчальні симулятори

Призначені для початківців. Забезпечують базові сценарії польотів і просту фізику. Приклад: FPV Air 2 — простий симулятор для тренування в режимі FPV.

2. Професійні тренувальні симулятори

Мають реалістичну фізику, змінні погодні умови, сценарії аварій, можливість підключення реального обладнання (пульта керування).

Наприклад:

- DJI Flight Simulator — офіційний продукт компанії DJI, який моделює поведінку популярних моделей дронів і використовується для навчання пілотів у різних галузях: сільському господарстві, інфраструктурному моніторингу, безпеці.

- Zephyr Drone Simulator — створений для навчальних закладів і серйозної підготовки операторів з можливістю оцінки результатів.

3. Дослідницькі та кастомні симулятори

Використовуються для моделювання складних сценаріїв, автономного керування, розробки нових алгоритмів. У таких симуляторах важливу роль відіграє гнучкість середовища.

Наприклад:

- Unity (у поєднанні з фізичними рушіями типу AirSim або DroneSim) — дозволяє створювати власні симуляції з кастомними дронами,

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

середовищами та інтелектуальними алгоритмами.

Таблиця 1.1.

Порівняльний аналіз симуляторів

Тип симулятора	Переваги	Недоліки
FPV Air 2	Доступний за ціною, легкий в освоєнні для новачків, підтримує FPV-контролер, простий інтерфейс.	Обмежена фізика, відсутність реалістичних сценаріїв, мала кількість налаштувань і тренувальних режимів.
DJI Flight Simulator	Висока реалістичність польоту, точне моделювання дронів DJI, сценарії цивільного та професійного використання, підтримка реального пульта, професійна графіка.	Працює лише з Windows, платний, обмежений тільки моделями DJI.
Unity + AirSim	Повна свобода в налаштуваннях, підходить для R&D і AI тренування, можна створювати кастомні дрони і середовища, реалістична фізика і сенсори.	Вимагає знань програмування, не готовий „з коробки“ – потрібно налаштовувати, високі системні вимоги.

Висновок: Симулятори керування дронами є важливим інструментом для ефективного та безпечного навчання операторів, а також для моделювання різних сценаріїв використання БПЛА. Порівняння симуляторів (FPV Air 2, DJI Simulator, Zephyr, DroneSim Pro, Unity + AirSim) показало, що кожен із них має власну сферу ефективності — від базового навчання до професійного моделювання. Вибір залежить від потреб користувача та завдань. Для України такі симулятори є особливо актуальними в умовах активного розвитку як військових, так і цивільних технологій БПЛА.

1.3. Вибір симулятора

У рамках кваліфікаційної роботи була розроблена програмна частина віртуального симулятора для навчання керування дроном з використанням ігрового рушія Unity. Процес розробки включав всебічне дослідження різних технологічних платформ та обґрунтування вибору найефективнішого середовища для реалізації поставлених цілей.

Визначення оптимальної платформи стало ключовим етапом проекту. Критерії вибору включали: гнучкість, масштабованість, доступність інструментів розробки, підтримку VR/AR технологій, загальносвітову підтримку спільноти розробників, а також відкритість до інтеграції сторонніх модулів. За результатами аналізу, найкращим рішенням виявилось середовище Unity — один із найпопулярніших та найуніверсальніших рушіїв на сучасному ринку.

Основні переваги Unity у контексті розробки цього симулятора:

- Кросплатформеність: Unity дозволяє створювати додатки для різних платформ (Windows, Android, VR-шоломи тощо), що дає змогу розширити можливості використання симулятора.
- Інтеграція з VR/AR: повноцінна підтримка віртуальної та доповненої реальності, що дозволяє створити більш занурюючий навчальний досвід.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- Широка бібліотека ресурсів: Unity має велику кількість готових 3D-моделей, інструментів фізики та плагінів, які значно прискорюють процес розробки.

- Активна спільнота та документація: розвинене співтовариство розробників дозволяє швидко вирішувати технічні проблеми, а якісна документація спрощує навчання і впровадження нових функцій.

Unity виявився оптимальним вибором для реалізації проєкту віртуального симулятора завдяки поєднанню збалансованих технічних можливостей, зручності у використанні, а також гнучкості у розробці та подальшій підтримці програмного продукту.

1.4. Загальні відомості дронів

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, — це літальні пристрої, які можуть виконувати польоти без пілота на борту, керовані дистанційно або працюють автономно за допомогою програмного забезпечення. Вони обладнані різноманітними сенсорами, камерами, GPS-модулями та іншими системами, що дозволяють виконувати широкий спектр завдань. Їх класифікують за різними критеріями: кількістю та розташуванням гвинтів або крил, мети використання, дальності польоту, масі корисного навантаження, базового механізму та ін.

За технічними характеристиками виділяють дрони трьох видів:

- вертолітного/коптерного (мультироторні – мультикоптерні та співвісні);
- літакового (з нерухомим крилом);
- гібридного (з гвинтами та крилами).

Типи дронів

- Мікро. Такі БПЛА важать менше 10 кг, максимальний час перебування у повітрі – 60 хвилин.

- Міні. Вага цих апаратів сягає 50 кг, час перебування у повітрі

		-				Арк.
					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сягає 5 годин.

- Міді. Безпілотні літальні апарати вагою до 1 тонни розраховані на 15 годин польоту.

- Важкі безпілотники.

Сфера застосування дронів охоплює:

- сільське господарство: моніторинг полів, аеросівба, внесення ЗЗР (AGRAS MG-1P (DJI), DJI Mavic 3, DJI Air 3),

- відеозйомку та фотозйомку: аерофотографія, кіноіндустрія (DJI Mavic 3, DJI Air 3, DJI Mini 4 Pro, Autel EVO Lite+, Skydio 2+),

- будівництво та інфраструктуру: інспекція мостів, дахів, ліній електропередач (DJI Mavic 3, Skydio 2+, Parrot Anafi USA),

- екологічний та геодезичний моніторинг (DJI Mavic 3, DJI Air 3, Autel EVO Lite+),

- рятувальні операції та військову справу (DJI Mavic 3, Skydio 2+, Parrot Anafi USA).

Таблиця 1.2.

Порівняльний аналіз дронів

Назва дрона	Переваги	Недоліки
DJI Mavic 3 (Рис.1.1,а)	Камера Hasselblad з матрицею 4/3, довгий час польоту, надійна система уникнення перешкод, підтримка передачі відео на великі відстані.	Висока вартість, для новачків — складний функціонал, великі розміри в порівнянні з Mini-серією.
Parrot Anafi USA (Рис.1.1,г)	Оптичний зум ×32, вбудований тепловізор, високий рівень безпеки передачі даних, сумісний з урядовими/спеціальними структурами.	Висока вартість, обмежена доступність на ринку, менша автономність порівняно з DJI.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Назва дрона	Переваги	Недоліки
Skydio 2+ (Рис.1.1,в)	Найкраще у світі уникнення перешкод, автономне слідування за об'єктом, можливість польоту у складних умовах.	Не підтримує повну ручну зйомку на рівні професіоналів, відносно невеликий час польоту, менше аксесуарів та налаштувань, ніж у DJI.
AGRAS MG-1P (DJI) (Рис.1.1,б)	Створений спеціально для аграрного сектору, велика вантажопідйомність, підтримка автономного розпилення за маршрутом, висока ефективність на великих полях.	Важкий і дорогий, потребує спеціальних навичок управління, вимагає технічного обслуговування і великих акумуляторів.



а



б



в



г

Рис.1.1. Види дронів: а) DJI Mavic 3, б) AGRAS MG-1P (DJI), в) Skydio 2+, г) Parrot Anafi USA.

Висновок: Дрони стали важливим інструментом у багатьох сферах. Завдяки сучасному обладнанню вони забезпечують точність, автономність і ефективність у виконанні різних завдань. Таким чином, БПЛА суттєво розширюють можливості у спостереженні, аналізі та дії без прямої участі людини.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.5. Вибір дрона

У рамках кваліфікаційної роботи було створено програмну частину віртуального симулятора для навчання управлінню дроном DJI Mavic. Основна увага приділялась аналізу функціональних можливостей сучасних безпілотних літальних апаратів, а також вибору оптимальної моделі дрона, яка б поєднувала у собі технічну досконалість, широку сферу застосування та актуальність для українських умов.

DJI Mavic було обрано як базову модель для симулятора з кількох ключових причин. По-перше, це один із найпопулярніших і найсучасніших дронів на ринку, який активно використовується як у цивільній, так і в професійній сферах — зокрема, у сільському господарстві, інспекціях інфраструктури, картографії, відеозйомці та моніторингу. По-друге, дрон має високий рівень автоматизації та штучного інтелекту, що дозволяє моделювати складні сценарії польоту, зокрема слідкування за об'єктом, обліт перешкод, автономне повернення тощо.

Крім того, DJI Mavic оснащений передовими камерами з подвійною оптикою, високою стабілізацією, системою багато-напрявленого уникнення перешкод та тривалим часом польоту — усе це робить його зразковим варіантом для моделювання реалістичних тренувальних сценаріїв у симуляторі. Така багатофункціональність дозволяє майбутнім операторам отримати цілісне уявлення про особливості керування сучасними дронами і навчитися приймати обґрунтовані рішення у складних умовах.

Вибір саме цієї моделі також зумовлений її актуальністю для України, де дрони використовуються не лише для зйомок чи аналізу місцевості, а й для гуманітарних, аграрних та безпекових завдань. Розробка симулятора на базі DJI Mavic дозволяє створити навчальне середовище, наближене до реального використання дронів у повсякденній практиці.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.6. Постановка задачі дослідження

Таким чином, тема «РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА КЕРУВАННЯ ДРОНОМ» є надзвичайно актуальною у сучасному контексті зростаючого використання безпілотних літальних апаратів у різноманітних сферах — від розваг і фото-відеозйомки до інженерних, екологічних та навіть оборонних задач. Розробка та впровадження віртуальних симуляторів дозволяє значно знизити поріг входу для новачків, мінімізувати ризики та фінансові витрати, пов'язані з реальним керуванням дроном, а також покращити якість і результативність навчального процесу. Використання сучасних технологій, таких як Unity для створення інтерактивного симуляційного середовища, а також віртуальної реальності, відкриває нові можливості для підготовки висококваліфікованих операторів дронів.

Об'єктом дослідження є процес створення та використання віртуального симулятора для навчання керуванню дроном DJI Mavic. Це охоплює розробку програмного забезпечення симулятора в середовищі Unity, моделювання фізичних характеристик польоту дрона, а також впровадження навчальних методик у віртуальному середовищі.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є дослідження та створення віртуального симулятора, що дозволить користувачам безпечно, ефективно й реалістично освоювати навички пілотування дрона DJI Mavic. Особливу увагу приділено інтеграції технологій віртуальної реальності для підвищення рівня занурення (іммерсивності) у процес навчання.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих рішень у сфері керування дронами DJI та віртуальних симуляторів;
- розробити концепцію симулятора у середовищі Unity;
- забезпечити інтеграцію з VR/AR технологіями;
- здійснити тестування та оцінку ефективності симулятора;
- виконати оптимізацію та удосконалення моделі симулятора.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

2.1. Математичне моделювання динаміки польоту дрона

Моделювання динаміки польоту безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є надзвичайно актуальним завданням в умовах сучасної України, де дрони відіграють важливу роль як в аграрному секторі, так і у сфері оборони. Для ефективного використання таких технологій необхідно мати глибоке розуміння фізичних принципів польоту та вміти точно реалізувати ці закони в програмних симуляціях.

Побудова динамічної моделі дрона включає декілька ключових етапів. Передусім здійснюється аналіз усіх зовнішніх і внутрішніх сил, що діють на апарат під час польоту. Це не лише гравітаційне притягання та тяга, а й опір повітря, бічні сили при зміні траєкторії, а також додаткові впливи, які можуть виникати внаслідок польоту над полем з різною топографією або в зоні бойових дій. Такі фактори критично важливі, коли дрон виконує завдання в умовах поривчастого вітру над сільгоспугіддями або несе корисне навантаження — наприклад, насіння, добрива, або навіть боєприпаси.

Моделювання системи управління дрона дозволяє врахувати, як апарат реагує на сигнали оператора. Зміна орієнтації, висоти або напрямку руху досягається шляхом регулювання обертання окремих пропелерів. Для реалізації точного управління застосовуються алгоритми, зокрема PID-регулятори, що забезпечують стабільну поведінку апарата як у відкритому полі, так і в прифронтовій зоні. Важливо також враховувати вплив зовнішнього середовища: вітрових навантажень, температурних перепадів, зміни атмосферного тиску — усе це впливає на аеродинамічну стійкість.

У центрі математичної моделі лежить система рівнянь стану, яка

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Задорожній Д.			РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		Несвідомін А.					18	
<i>Н. Контр.</i>						НУБіП України		
<i>Затверд.</i>								

описує повну динаміку руху дрона. Для обчислень у програмному забезпеченні використовують числові методи розв'язання диференціальних рівнянь, зокрема метод Рунге-Кутти, що дає змогу точно змодельовати зміну положення апарата з часом.

У реальних умовах польоту — наприклад, під час аерозйомки полів, внесення мікродобрив або доставки вантажу на позиції — постає питання забезпечення стабільності в повітрі. Мультикоптери стали універсальним засобом для таких завдань через свою маневровість, компактність і простоту запуску. Але за цими перевагами стоїть складна система математичних розрахунків, які дозволяють адаптувати керування до будь-якої ситуації — чи то обліт посівів, чи екстрене скидання вантажу на визначену координату.

Рух дрона в тривимірному просторі досягається завдяки зміні обертальних швидкостей окремих роторів. Це дозволяє гнучко змінювати положення дрона в повітрі відповідно до команди пілота. Контролер, розміщений на бортовому комп'ютері дрона, виконує обчислення, трансформуючи сигнали вхідного управління у набір матричних операцій і перетворень, що базуються на законах лінійної алгебри.

Особливо важливою стає точність при зміні навантаження. Наприклад, агродрони, що розпилюють рідкі добрива, або військові дрони, які транспортують боєприпаси, змінюють свою масу й центр тяжіння під час виконання завдання. Це впливає на стабільність польоту, і вимагає повторного калібрування (тримірування) системи управління. Якщо вантаж не рівномірно розподілений, дрон може втратити рівновагу або навіть перевернутись. Саме тому для розрахунків критично важливо враховувати вагу, положення центру мас і конфігурацію роторів.

Серед найбільш поширених конструкцій — квадрокоптери, гексакоптери та октокоптери. Їх обирають як фермери для точного землеробства, так і військові для розвідки, спостереження чи доставлення спорядження. У військовому контексті особливо популярні FPV-дрони

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

формату Quad — вони дешеві, швидкі та легко модифікуються. На рис.2.1 представлено основні типи таких апаратів.

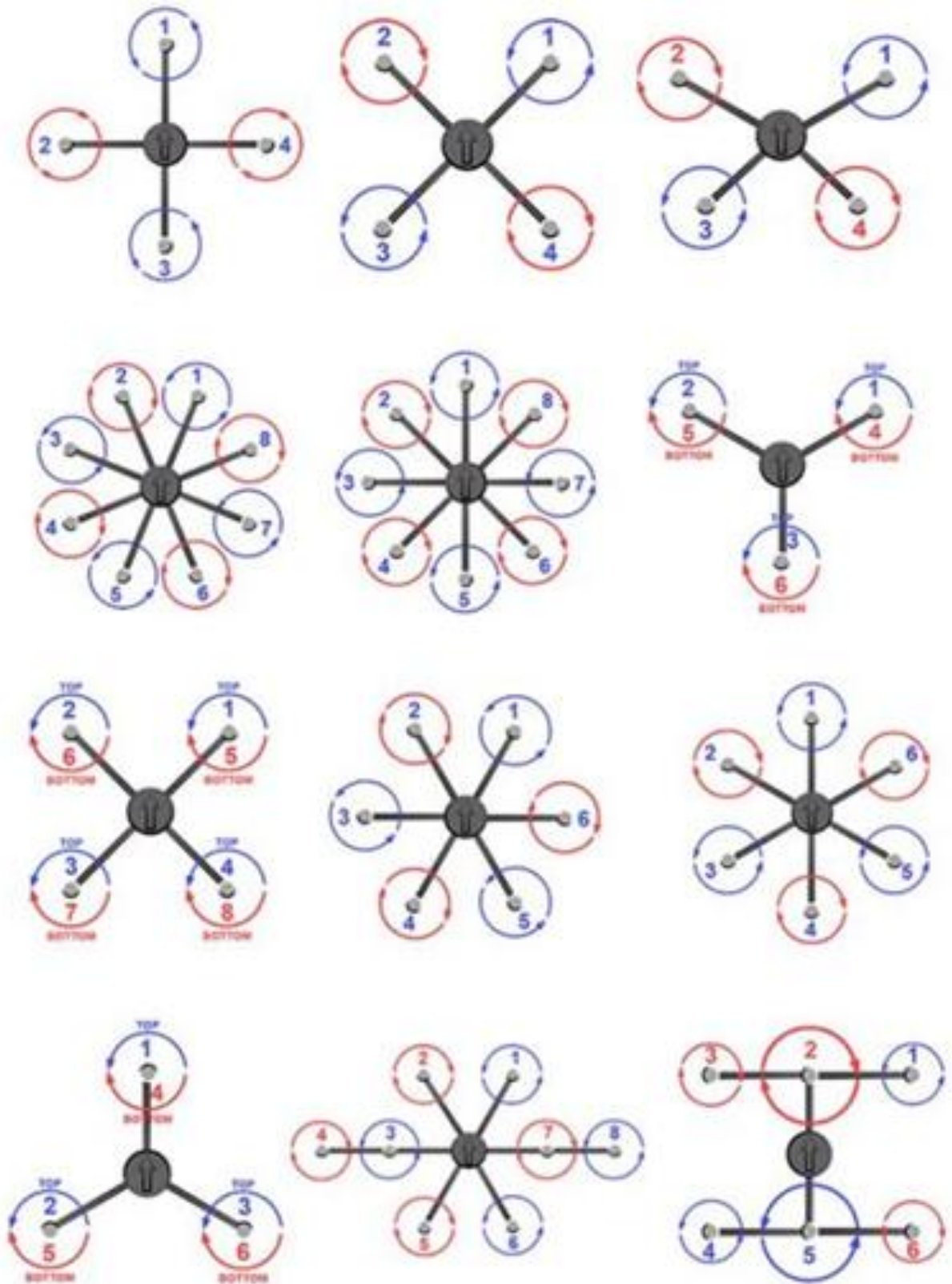


Рис.2.1. Основні існуючі типи дронів.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк. 20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Керування мультикоптером базується на обертанні роторів у різних напрямках — половина обертається за годинниковою стрілкою, інша — проти, що дозволяє компенсувати обертальні моменти та уникнути неконтрольованого обертання дрону. При зміні швидкості обертання певних роторів дрон змінює положення: нахиляється, котиться або повертається навколо своєї осі. Ці принципи керування описані на рисунках 2.2, 2.3, 2.4.

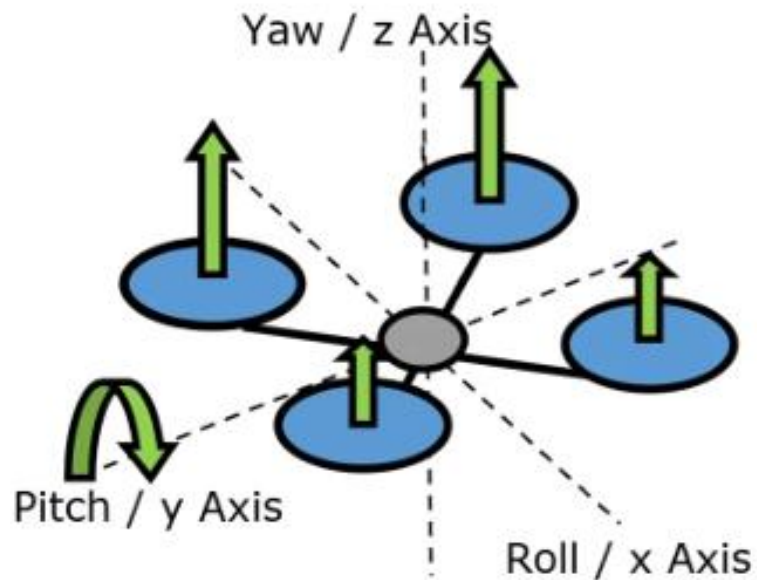


Рис. 2.2. Перший приклад бічного руху дрону.

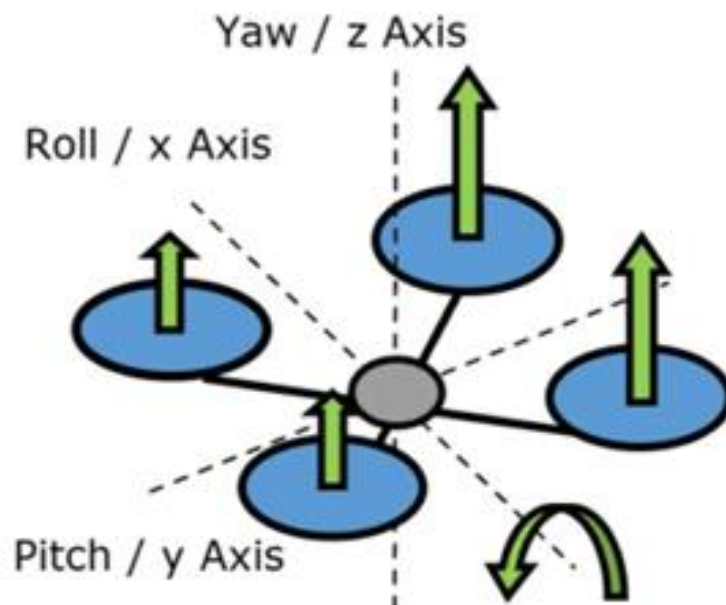


Рис. 2.3. Другий приклад бічного руху дрону.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

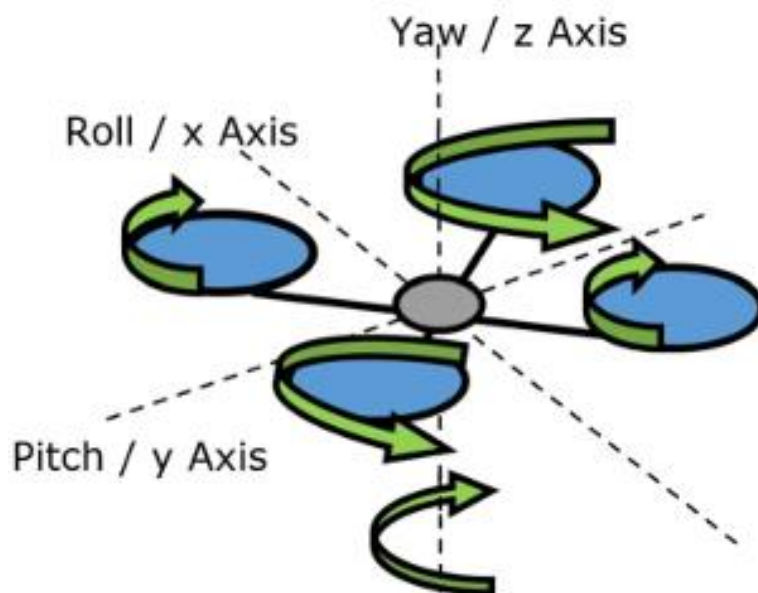


Рис. 2.4. Приклад оберту дрону.

Зміна висоти здійснюється шляхом синхронного прискорення або сповільнення всіх роторів. Але для збереження стабільності потрібна точна настройка, що виконується під час підготовки до польоту. Калібрування за допомогою датчиків положення в просторі дає змогу точно налаштувати дрон, зокрема, якщо він виконує завдання з нестандартним навантаженням, наприклад, боєприпасом або сенсорним блоком. Процес калібрування зображено на рис.2.5.

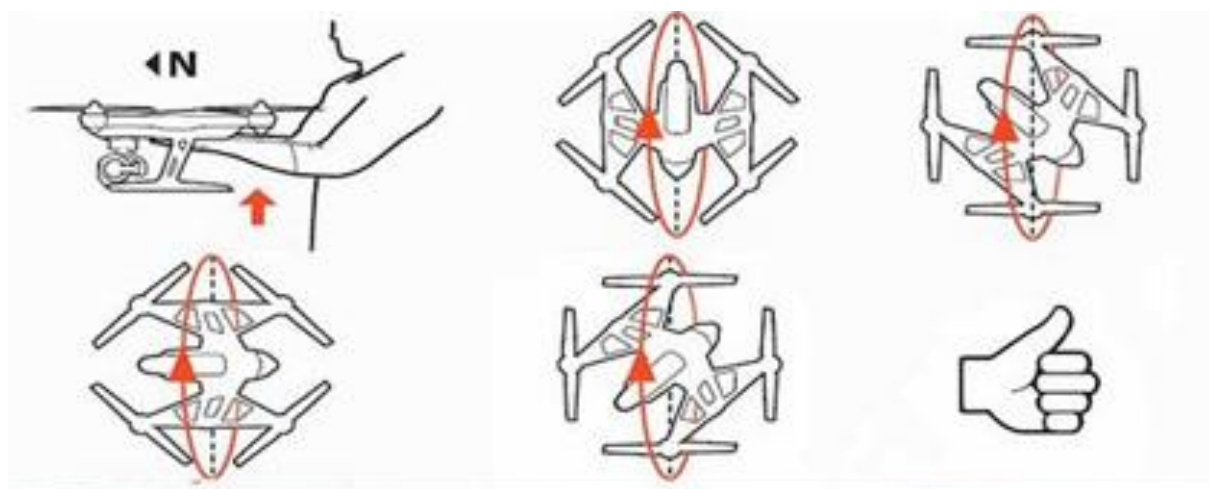


Рис. 2.5. Процес тримірування дрону.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Більшість сучасних дронів мають базові засоби ручного налаштування — чотири кнопки тримірування (вліво, вправо, вперед, назад). Вісь "вперед-назад" відповідає за тангаж, а "вліво-вправо" — за крен. Комбіноване використання дозволяє виконувати складні повороти, змінюючи напрямки швидко й ефективно. Ці регулятори зазвичай розташовані поруч із джойстиком пульта управління. Додатково існує регулятор курсового кута, який забезпечує баланс обертання вліво або вправо. Приклад типової схеми контролера подано на рис.2.6.



Рис. 2.6. Контролер для керування дроном.

2.2. Програмна реалізація симулятора у Unity

Програмна частина проєкту зосереджена на створенні інтерактивного віртуального середовища в Unity, яке відтворює реалістичні умови польоту

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

дрона DJI Mavic 3 в аграрному секторі. Основна мета полягає в моделюванні сценаріїв, пов'язаних із моніторингом стану посівів, аналізом врожайності, картографуванням полів та проведенням польових оглядів — задач, що стають особливо актуальними в умовах післявоєнного відновлення аграрної галузі України.

Інтеграція фізичної моделі дрона у середовище Unity реалізується за допомогою спеціальних скриптів на C#, які відповідають за обчислення просторового положення дрона, його орієнтацію, реакцію на сигнали управління та інші динамічні параметри польоту. Наприклад, створено систему, яка зчитує дані з джойстика чи іншого контролера, а потім передає ці значення до віртуальної моделі дрона, забезпечуючи адекватну симуляцію польоту (схема наведена на рис.2.7).



Рис.2.7. Приклад керування дроном.

Інтерфейс користувача відіграє ключову роль у взаємодії з симулятором. Він включає індикатори висоти, швидкості, заряду акумулятора, стану GPS-з'єднання та інші дані, необхідні для ефективного управління дроном під час аграрних завдань. Крім цього, інтерактивна панель управління дозволяє змінювати сценарії використання дрона —

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

наприклад, перемикається між режимами огляду посівів, обстеження технічних об'єктів або обльоту меж поля.

Unity надає широкі можливості для створення реалістичних віртуальних ландшафтів, які імітують типові аграрні території України: поля різних культур, сільськогосподарські угіддя, технічні зони та природні перешкоди. Завдяки сучасним інструментам Unity — URP/HDRP, Shader Graph, системам частинок — можна моделювати погодні умови (вітер, дощ, туман), освітлення, зміну часу доби, що є важливими факторами для підготовки до реального польоту в польових умовах (див. рис.2.8).



Рис.2.8. Віртуальне середовище.

Фізична симуляція в Unity використовується для імітації реальних аеродинамічних властивостей дрона DJI Mavic, таких як гравітація, інерція, опір повітря, зіткнення з об'єктами. Усі ці параметри налаштовуються індивідуально для досягнення відповідності фактичній поведінці апарата в польоті.

Алгоритми, що відповідають за обробку користувацького введення,

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

перетворюють рухи на контролері на відповідні керуючі команди, що застосовуються до симульованого дрона в режимі реального часу. Завдяки цьому симулятор дозволяє відпрацьовувати точне позиціонування над ділянками, польоти на малій висоті для збору знімків високої роздільності, а також тренування автоматизованих маршрутів обльоту полів за GPS-точками.

В рамках проєкту реалізовано серію тренувальних модулів, які імітують типові аграрні завдання. Це можуть бути:

- польоти для моніторингу стану рослин;
- вимірювання NDVI-індексів (імітація візуального збору даних);
- огляд полів перед збиранням урожаю;
- перевірка систем зрошення;
- обстеження важкодоступних ділянок.

Для підвищення рівня занурення та точності тренувань передбачено інтеграцію з VR/AR-технологіями. Наприклад, у VR-режимі оператор може бачити світ очима дрона, відчуваючи повну присутність у віртуальному середовищі. Це особливо корисно для навчання нових пілотів агродронів та для ознайомлення з польовими умовами без потреби фізичного виїзду на місце.

Упродовж усього циклу розробки здійснюється ретельне тестування системи, яке включає автоматичне тестування логіки польоту, валідацію фізики взаємодії та тестування з реальними користувачами — агрооператорами, студентами профільних ЗВО та фахівцями з дрон-агромоніторингу. Це дає змогу перевірити функціональність симулятора, зручність інтерфейсу та відповідність поведінки дрона його реальному аналогу — DJI Mavic. Приклад процесу тестування наведено на рис.2.9.

					Арк.
					26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ

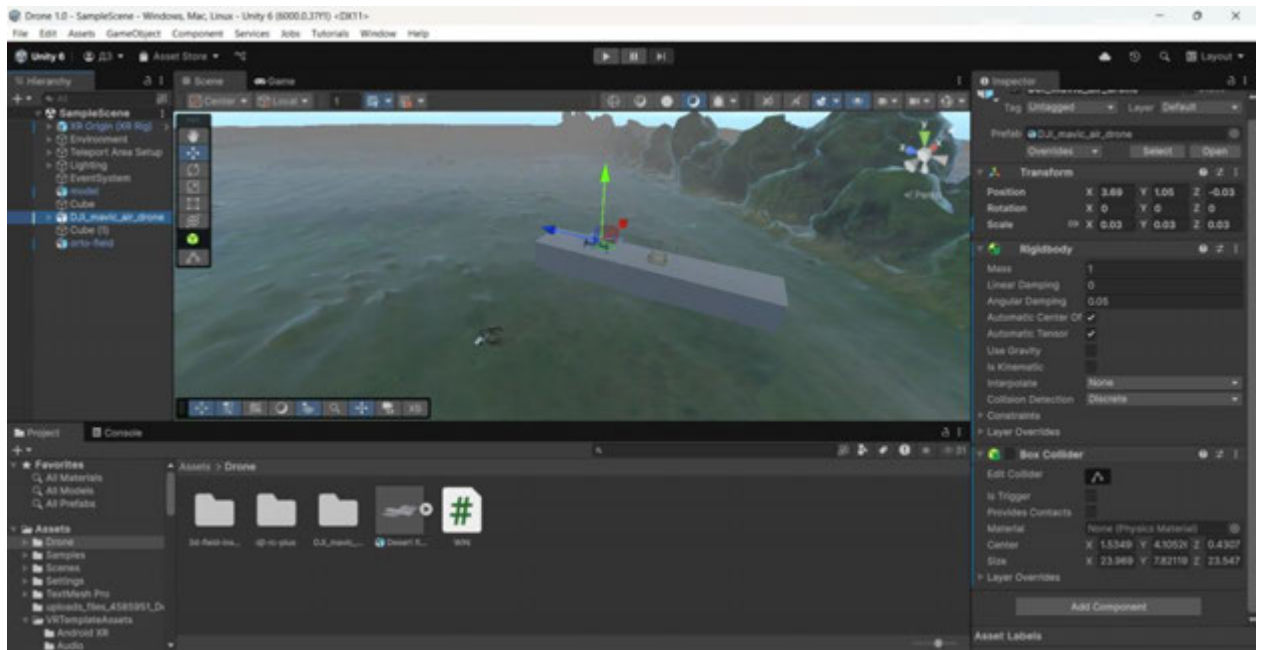


Рис.2.9. Приклад тестування.

2.3. Розробка середовища

У рамках кваліфікаційної роботи була реалізована програмна частина віртуального симулятора для навчання управлінню дроном DJI Mavic в аграрній сфері. Основна мета — забезпечити можливість безпечного та ефективного відпрацювання навичок пілотування у віртуальному середовищі, що відображає характерні умови для сільськогосподарських застосувань.

Для економії часу та з метою оптимізації процесу розробки було використано вже готове 3D-середовище сільськогосподарської місцевості (рис.2.10), завантажене з платформи Sketchfab, а також високоякісну модель дрона DJI Mavic (рис.2.11) з того ж ресурсу. Це дозволило зосередитися на розробці функціональної логіки симулятора без необхідності самостійного моделювання візуальних компонентів.

Як платформу для реалізації проєкту було обрано Unity, зважаючи на її гнучкість, широку підтримку, потужні можливості для кросплатформенної розробки та багатий набір інструментів для роботи з фізикою, 3D-графікою

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27



Рис.2.10. 3D-інспекція польових робіт

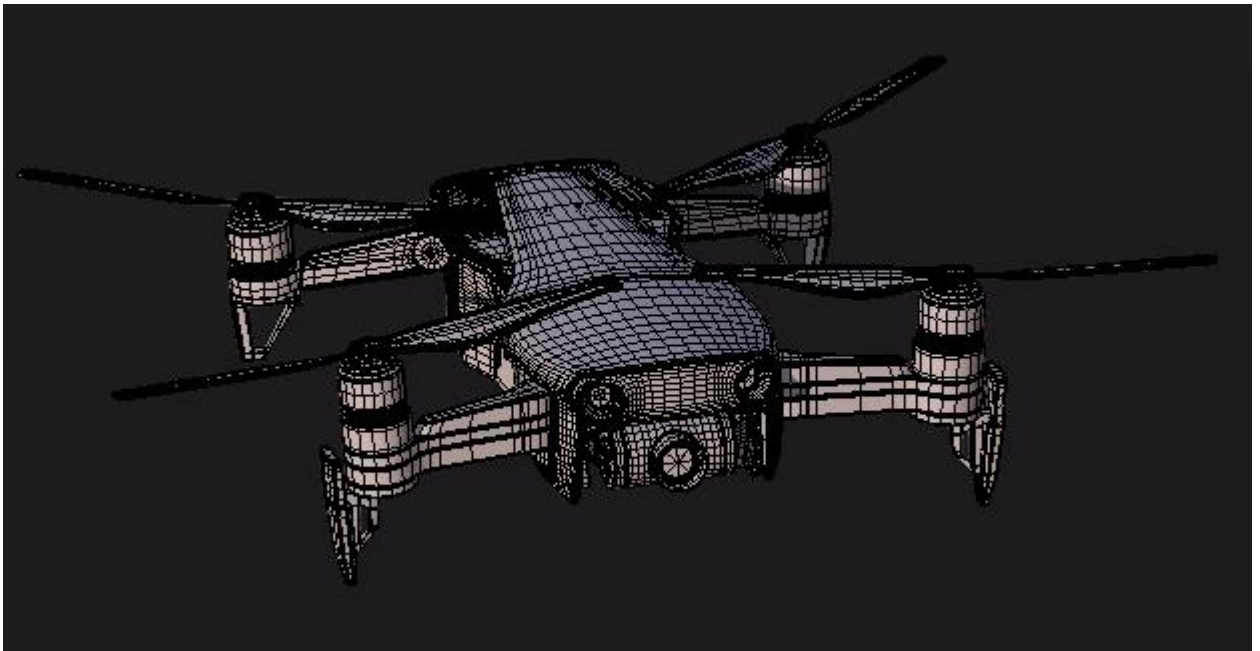


Рис.2.11. DJI Mavic

та інтерактивністю. Вибір Unity був обґрунтований також його популярністю у спільноті розробників та наявністю численних ресурсів для самонавчання.

Розробка включала інтеграцію 3D-моделі дрона у віртуальне середовище та реалізацію базових функцій керування. Важливим етапом

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

стало створення логіки управління дроном: обробка вхідних сигналів з джойстиків, їх перетворення в параметри стіків, а також подальше використання цих параметрів для обчислення положення та орієнтації дрона в просторі. Частину функціональних кодів (рисунок 2.12-24) було згенеровано та адаптовано за допомогою штучних інтелектів, зокрема з використанням рекомендацій, отриманих від декількох різних мовних моделей. Це значно пришвидшило розробку та дозволило уникнути багатьох типових помилок.

```

Файл Редагувати Переглянути
public float rotationSpeed = 100f; // швидкість обертання
public Vector3 rotationAxis = Vector3.up; // Вісь обертання
public Transform rotationCenter; // Центр обертання
public float activationDelay = 1f; // Затримка перед активацією

private bool hasMoved = false;
private Vector3 lastPosition;
private bool delayPassed = false;

void Start()
{
    if (controller != null)
    {
        lastPosition = controller.position;
    }

    // Запускаємо затримку перед активацією
    Invoke(nameof(EnableActivation), activationDelay);
}

void Update()
{
    if (delayPassed && !hasMoved && controller != null)
    {
        if (Vector3.Distance(controller.position, lastPosition) > 0.01f)
        {
            hasMoved = true;
        }
    }

    if (hasMoved && rotationCenter != null)
    {
        transform.RotateAround(rotationCenter.position, rotationAxis, rotationSpeed * Time.deltaTime);
    }
}

void EnableActivation()
{
    delayPassed = true; // Дозволяємо перевірку руху після затримки
}
}

```

Рис.2.12. Код обертання пропелерів дрона

```

using UnityEngine;
using UnityEngine.XR;

using System.Collections.Generic;

[RequireComponent(typeof(UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Interactables.XRGrabInteractable))]
public class ControllerDronePilot : MonoBehaviour
{
    [Tooltip("Об'єкт дрона")]
    public Transform drone;

    [Tooltip("Центральна точка для обертання дрона (наприклад, порожній об'єкт у центрі моделі)")]
    public Transform dronePivot;

    [Tooltip("Максимальна швидкість руху (м/с)")]
    public float moveSpeed = 2f;

    [Tooltip("Максимальна швидкість повороту (град/с)")]
    public float turnSpeed = 90f;

    [Tooltip("XR Rig або XR Origin (для фіксації повороту)")]
    public Transform xrRig;

    private UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Interactables.XRGrabInteractable grabInteractable;
    private bool isGrabbed = false;
    private InputDevice controllerDevice; // правий контролер
    private InputDevice leftControllerDevice; // лівий контролер
    private float initialRotation;

    void Awake()
    {
        grabInteractable = GetComponent<UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Interactables.XRGrabInteractable>();
        grabInteractable.selectEntered.AddListener(_ => OnGrabbed());
        grabInteractable.selectExited.AddListener(_ => OnReleased());
    }

    void OnDestroy()
    {
    }
}

```

Рис.2.13. Перша частина коду керування дроном

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

```

Файл Редагувати Переглянути
grabInteractable.selectEntered.RemoveAllListeners();
grabInteractable.selectExited.RemoveAllListeners();
}

private void OnGrabbed()
{
    isGrabbed = true;

    if (xrRig != null)
        initialVRotation = xrRig.eulerAngles.y;

    // Отримуємо правий контролер
    var rightDevices = new List<InputDevice>();
    InputDevices.GetDevicesAtXRNode(XRNode.RightHand, rightDevices);
    if (rightDevices.Count > 0)
        controllerDevice = rightDevices[0];

    // Отримуємо лівий контролер
    var leftDevices = new List<InputDevice>();
    InputDevices.GetDevicesAtXRNode(XRNode.LeftHand, leftDevices);
    if (leftDevices.Count > 0)
        leftControllerDevice = leftDevices[0];
}

private void OnReleased()
{
    isGrabbed = false;
}

void Update()
{
    // Вісуюмо орієнтацію XR Rig: його Y кут залишиться таким, як був при захопленні
    if (isGrabbed && xrRig != null)
    {
        Vector3 currentRotation = xrRig.eulerAngles;
        currentRotation.y = initialVRotation;
        xrRig.eulerAngles = currentRotation;
    }
}

```

Рис.2.14. Друга частина коду керування дрона

```

Файл Редагувати Переглянути
if (!isGrabbed || drone == null)
    return;

// Оновлення правого контролера, якщо він недійсний
if (!controllerDevice.isValid)
{
    var rightDevices = new List<InputDevice>();
    InputDevices.GetDevicesAtXRNode(XRNode.RightHand, rightDevices);
    if (rightDevices.Count > 0)
        controllerDevice = rightDevices[0];
    return;
}

// Горизонтальний рух і поворот дрона за стиком правого контролера
if (controllerDevice.TryGetFeatureValue(CommonUsages.primary2DAxis, out Vector2 axisInput))
{
    float forwardMove = axisInput.y * moveSpeed * Time.deltaTime;
    float rotationAmount = axisInput.x * turnSpeed * Time.deltaTime;

    // Переміщення дрона вперед/назад
    Vector3 forward = drone.forward;
    drone.position += forward * forwardMove;

    // Поворот дрона: якщо задано pivot, обертаємо навколо нього; інакше обертаємо навколо осі Y
    if (dronePivot != null)
        drone.RotateAround(dronePivot.position, Vector3.up, rotationAmount);
    else
        drone.Rotate(0, rotationAmount, 0);
}

// Вертикальний рух дрона: правий тригер піднімає, лівий тригер опускає
float verticalInput = 0f;

// Правий контролер: зчитуємо значення тригера для підняття
if (controllerDevice.TryGetFeatureValue(CommonUsages.trigger, out float rightTrigger))
    verticalInput += rightTrigger;

// Лівий контролер: оновлюємо, якщо необхідно
if (!leftControllerDevice.isValid)

```

Рис.2.15. Третя частина коду керування дрона

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

```

float forwardMove = axisInput.y * moveSpeed * Time.deltaTime;
float rotationAmount = axisInput.x * turnSpeed * Time.deltaTime;

// Переміщення дрона вперед/назад
Vector3 forward = drone.forward;
drone.position += forward * forwardMove;

// Поворот дрона: якщо задано pivot, обертаємо навколо нього; інакше обертаємо навколо осі Y
if (dronePivot != null)
    drone.RotateAround(dronePivot.position, Vector3.up, rotationAmount);
else
    drone.Rotate(0, rotationAmount, 0);
}

// Вертикальний рух дрона: правий тригер піднімає, лівий тригер опускає
float verticalInput = 0f;

// Правий контролер: зчитуємо значення тригера для підйому
if (controllerDevice.TryGetFeatureValue(CommonUsages.trigger, out float rightTrigger))
    verticalInput += rightTrigger;

// Лівий контролер: аналогічно, якщо необхідно
if (!leftControllerDevice.isValid)
{
    var leftDevices = new List<InputDevice>();
    InputDevices.GetDevicesAtXRNode(XRNode.LeftHand, leftDevices);
    if (leftDevices.Count > 0)
        leftControllerDevice = leftDevices[0];
}
if (leftControllerDevice.isValid && leftControllerDevice.TryGetFeatureValue(CommonUsages.trigger, out float leftTrigger))
    verticalInput -= leftTrigger;

float verticalMove = verticalInput * moveSpeed * Time.deltaTime;
Vector3 newPos = drone.position;
newPos.y = Mathf.Max(0, newPos.y + verticalMove);
drone.position = newPos;
}
}

```

Рис.2.16. Четверта частина коду керування дрона

```

using UnityEngine;

public class SpecificObjectWindZone : MonoBehaviour
{
    [Header("Цільовий об'єкт (дрон)")]
    [Tooltip("Об'єкт, до якого буде застосовано імпульс, коли він знаходиться в зоні")]
    public GameObject targetObject;

    [Header("Налаштування сили вітру")]
    [Tooltip("Мінімальна сила імпульсу вітру")]
    public float minForce = 1f;
    [Tooltip("Максимальна сила імпульсу вітру")]
    public float maxForce = 5f;

    [Header("Налаштування інтервалу")]
    [Tooltip("Інтервал (в секундах), через який перевіряється наявність цільового об'єкта у зоні")]
    public float pushInterval = 3f;

    [Header("Налаштування зони")]
    [Tooltip("Вектор центру зони від положення цього об'єкта")]
    public Vector3 zoneCenter = Vector3.zero;
    [Tooltip("Позиція зони (Box)")]
    public Vector3 zoneSize = new Vector3(5f, 5f, 5f);

    private float timer = 0f;

    void update()
    {
        timer += Time.deltaTime;
        if (timer >= pushInterval)
        {
            CheckAndApplyWind();
            timer = 0f;
        }
    }

    /// <summary>
    /// Перевіряємо, чи знаходиться targetObject всередині зони, і якщо так - застосовуємо імпульс.
    /// </summary>
    void CheckAndApplyWind()

```

Рис.2.17. Перша частина коду вітра

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

```

Файл Редагувати Переглянути
void CheckAndApplyWind()
{
    // Обчислюємо світову позицію центру зони
    Vector3 worldZoneCenter = transform.position + zoneCenter;

    // Випрацюємо OverlapBox для отримання всіх Collider у зоні.
    Collider[] colliders = Physics.OverlapBox(worldZoneCenter, zoneSize * 0.5f);
    bool isTargetInside = false;

    foreach (Collider col in colliders)
    {
        if (col.gameObject == targetObject)
        {
            isTargetInside = true;
            break;
        }
    }

    if (isTargetInside)
    {
        Debug.Log($"{targetObject.name} знаходиться в зоні, застосовуємо імпульс.");
        ApplyWindForce();
    }
    else
    {
        Debug.Log($"{targetObject.name} НЕ в зоні.");
    }
}

/// <summary>
/// Застосовує випадковий імпульс до targetObject.
/// Переконайтеся, що на ньому є компонент Rigidbody (і він не kinematic).
/// </summary>
void ApplyWindForce()
{
    Rigidbody rb = targetObject.GetComponent<Rigidbody>();
    if (rb != null && !rb.isKinematic)
    {
        Vector3 randomDirection = Random.insideUnitSphere.normalized;
        float randomForce = Random.Range(minForce, maxForce);
        rb.AddForce(randomDirection * randomForce, ForceMode.Impulse);
    }
}

```

Рядок 96, стовпець 2 100% Windows (CRLF) UTF-8

Рис.2.18. Друга частина коду вітра

```

}

if (isTargetInside)
{
    Debug.Log($"{targetObject.name} знаходиться в зоні, застосовуємо імпульс.");
    ApplyWindForce();
}
else
{
    Debug.Log($"{targetObject.name} НЕ в зоні.");
}

/// <summary>
/// Застосовує випадковий імпульс до targetObject.
/// Переконайтеся, що на ньому є компонент Rigidbody (і він не kinematic).
/// </summary>
void ApplyWindForce()
{
    Rigidbody rb = targetObject.GetComponent<Rigidbody>();
    if (rb != null && !rb.isKinematic)
    {
        Vector3 randomDirection = Random.insideUnitSphere.normalized;
        float randomForce = Random.Range(minForce, maxForce);
        rb.AddForce(randomDirection * randomForce, ForceMode.Impulse);
        Debug.Log($"Застосовано імпульс: {randomDirection * randomForce}");
    }
    else
    {
        Debug.LogWarning("На цільовому об'єкті відсутній Rigidbody або він є kinematic.");
    }
}

// Для візуалізації зони у редакторі
private void OnDrawGizmos()
{
    Gizmos.color = Color.cyan;
    Vector3 worldZoneCenter = transform.position + zoneCenter;
    Gizmos.DrawWireCube(worldZoneCenter, zoneSize);
}
}

```

Рядок 96, стовпець 2 100% Windows (CRLF) UTF-8

Рис.2.19. Третя частина коду вітра

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

```

Файл Редагувати Переглянути
public float rainForce = -1.5f; // негативна вертикальна сила
public float windInstability = 0.5f;

private bool isRaining = false;
private float nextRainToggle;

void Start()
{
    if (rainParticles != null) rainParticles.Stop();
    ScheduleNextRainToggle();
}

void Update()
{
    if (Time.time >= nextRainToggle)
    {
        ToggleRain();
        ScheduleNextRainToggle();
    }
}

void FixedUpdate()
{
    if (isRaining && droneB != null)
    {
        // Ефект тяготи (дош тисне вниз)
        droneB.AddForce(Vector3.up * rainForce, ForceMode.Force);

        // Дрібна турбулентність
        Vector3 disturbance = new Vector3(
            Random.Range(-windInstability, windInstability),
            0,
            Random.Range(-windInstability, windInstability)
        );
        droneB.AddForce(disturbance, ForceMode.Force);
    }
}

void ToggleRain()
{

```

Рис.2.20. Перша части коду доща

```

    {
        ToggleRain();
        ScheduleNextRainToggle();
    }
}

void FixedUpdate()
{
    if (isRaining && droneB != null)
    {
        // Ефект тяготи (дош тисне вниз)
        droneB.AddForce(Vector3.up * rainForce, ForceMode.Force);

        // Дрібна турбулентність
        Vector3 disturbance = new Vector3(
            Random.Range(-windInstability, windInstability),
            0,
            Random.Range(-windInstability, windInstability)
        );
        droneB.AddForce(disturbance, ForceMode.Force);
    }
}

void ToggleRain()
{
    isRaining = !isRaining;

    if (rainParticles != null)
    {
        if (isRaining)
            rainParticles.Play();
        else
            rainParticles.Stop();
    }
}

void ScheduleNextRainToggle()
{
    float interval = Random.Range(10f, 20f); // інтервал зміни погоди
    nextRainToggle = Time.time + interval;
}

```

Рис.2.21. Друга части коду доща

```

using UnityEngine;
using System.Collections;

public class StormController : MonoBehaviour
{
    [Header("Scene refs")]
    public Rigidbody droneRb; //
    public ParticleSystem rainParticles;
    public Light lightningLight; //
    public AudioSource thunderAudio; //

    [Header("Rain")]
    public float baseRainForce = -2.0f; // середня швидкість дощу
    public float rainInstability = 1.0f; // різниця турбулентності

    [Header("Gusts of wind")]
    public float gustStrength = 5f; // імпульсний порив
    public float gustIntervalMin = 3f; // сек
    public float gustIntervalMax = 7f; // сек

    [Header("Lightning & thunder")]
    public float lightningInterval = 5f; // сек між ударами
    public float lightningMaxInterval = 12f;
    public float lightningLashDuration = 0.2f; // тривалість спалаху

    private float nextGust;
    private float nextLightning;

    void Start()
    {
        if (rainParticles != null) rainParticles.Play();

        if (lightningLight != null) lightningLight.enabled = false;
        ScheduleNextGust();
        ScheduleNextLightning();
    }

    void Update()
    {
        // Екранова
    }
}

```

Рис.2.22. Перша частина коду грози

```

        ScheduleNextLightning();
    }

    void Update()
    {
        // Екранова
        if (time.time >= nextLightning)
        {
            StartCoroutine(LightningStrike());
            ScheduleNextLightning();
        }
    }

    void FixedUpdate()
    {
        if (droneRb == null) return;

        // Тиск дощу
        float dynamicRain = baseRainForce + Random.Range(-0.5f, 0.5f);
        droneRb.AddForce(Vector3.up * dynamicRain, ForceMode.Force);

        // Різниця турбулентності
        Vector3 disturbance = new Vector3(
            Random.Range(-rainInstability, rainInstability),
            0,
            Random.Range(-rainInstability, rainInstability)
        );
        droneRb.AddForce(disturbance, ForceMode.Force);

        // Попере вітри
        if (time.time >= nextGust)
        {
            Vector3 gustDir = new Vector3(
                Random.Range(-1f, 1f),
                0,
                Random.Range(-1f, 1f)
            ).normalized;
            droneRb.AddForce(gustDir * gustStrength, ForceMode.Impulse);
            ScheduleNextGust();
        }
    }
}

```

Рис.2.23. Друга частина коду грози

```
File Edit View Help
0,
  Random.Range(-rainInstability, rainInstability)
);
droneB.AddForce(disturbance, ForceMode.force);

// Поповняє шипти
if (Time.time >= nextGust)
{
  Vector3 gustDir = new Vector3(
    Random.Range(-1f, 1f),
    0,
    Random.Range(-1f, 1f)
  ).normalized;
  droneB.AddForce(gustDir * gustStrength, ForceMode.Impulse);
  ScheduleNextGust();
}

}

void ScheduleNextGust() => nextGust = Time.time + Random.Range(gustIntervalMin, gustIntervalMax);
void ScheduleNextLightning() => nextLightning = Time.time + Random.Range(lightningMinInterval, lightningMaxInterval);

IEnumerator lightningStrike()
{
  // снаряд
  if (lightningLight != null)
  {
    lightningLight.enabled = true;
    yield return new WaitForSeconds(lightningFlashDuration);
    lightningLight.enabled = false;
  }

  // затримка звуку (швидкість звуку = 340 м/с)
  if (thunderAudio != null)
  {
    float delay = Random.Range(0.5f, 2.5f);
    yield return new WaitForSeconds(delay);
    thunderAudio.Play();
  }
}
}
```

Рис.2.24. Третя частина коду грози

Інтерфейс користувача був адаптований для аграрного застосування: у ньому реалізовано візуалізацію параметрів польоту, таких як швидкість, висота, заряд батареї, а також реалізовано інтуїтивну схему управління дроном — як із джойстиком, так і за допомогою клавіатури чи геймпада. Окрему увагу приділено реалізації агросценаріїв — наприклад, спостереження за полем, моделювання огляду посівів, виявлення умовних проблемних ділянок тощо.

Unity забезпечує можливості точного моделювання фізичних процесів, включно з гравітацією, вітром та зіткненнями. Ці аспекти були використані для симуляції поведінки дрона в різних погодних умовах (рисунки 2.25, 2.26). Також створено декілька тренувальних модулів — від базових польотів до сценаріїв, які імітують польоти вздовж агрономічних маршрутів або виконання точкових оглядів.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35



Рис.2.25. Приклад природної умови (дощ 1)



Рис.2.26. Приклад природних умови (дощ 2)

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Для забезпечення занурення було додано підтримку VR та AR (рисунки 2.27, 2.28), що дозволяє використовувати симулятор як з традиційним екраном, так і в шоломах віртуальної реальності. Це відкриває нові можливості для навчання пілотів агродронів, особливо у віддалених умовах.



Рис.2.27. VR окуляри



Рис.2.28. Занурення у віртуальну реальність

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Процес тестування проходив на всіх етапах розробки. Це включало як автоматичне тестування компонентів, так і ручну перевірку юзабіліті, з урахуванням зворотного зв'язку від потенційних користувачів. У результаті вдалося досягти стабільної роботи симулятора з належною реалістичністю польотної динаміки.

Таким чином, використання Unity у поєднанні з готовими ресурсами Sketchfab та підтримкою штучного інтелекту дозволило ефективно реалізувати навчальний симулятор для аграрного використання дронів DJI Mavic 3, який може стати основою для подальших досліджень, розширень і практичного впровадження в системах підготовки операторів БПЛА.

2.4. Розробка інтерфейсу користувача

Проектування інтерфейсу користувача (UI) та системи взаємодії в симуляторі стало ключовим компонентом загальної розробки, оскільки саме від нього залежить зручність, доступність та ефективність навчального процесу. Особливо це актуально в аграрному застосуванні дронів, де оператори повинні мати змогу швидко сприймати критичну інформацію та реагувати на зміну умов середовища.

Основними напрямками роботи над UI були:

1. Конструювання інтерфейсу візуального моніторингу:

Було створено інтерфейс, що відображає всі важливі показники польоту — швидкість дрона, висоту, рівень заряду акумулятора, кути нахилу корпусу, GPS-координати, а також індикатори можливих перешкод чи втрати зв'язку. Інформація подається в зрозумілому, компактному вигляді, без перевантаження екрану, що особливо важливо при використанні гарнітури Oculus Quest 2.

2. Система керування польотом:

Функціональність управління дроном була реалізована через три режими: клавіатура та миша, ігровий контролер (наприклад, DualShock 4), а

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

також повноцінний RC-контролер (рис.2.29), що максимально наближує віртуальне управління до реальних умов.

Було приділено увагу адаптивності — новачки можуть використовувати спрощене керування, тоді як більш досвідчені користувачі мають доступ до точного налаштування осей, чутливості та режимів польоту.



Рис.2.29. Приладдя управління дроном

3. *Імітація реального досвіду в Unity + VR:*

Впровадження VR-режиму за допомогою Oculus Quest 2 дозволяє користувачеві повноцінно зануритися у середовище управління дроном, що суттєво підвищує якість навчання. Було розроблено окремий VR-інтерфейс (рис.2...), який пристосований до обмежень поля зору та специфіки навігації у віртуальному просторі. У VR-версії застосовано елементи взаємодії за допомогою контролерів Oculus, зокрема жестів для доступу до меню, запуску чи паузи польоту.

4. *Система навчальних підказок і динамічного зворотного зв'язку:*

Для підтримки процесу навчання було реалізовано інтелектуальну систему підказок, що активуються у відповідь на типові помилки

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

користувача (рисунки 2.30, 2.31). Наприклад, якщо дрон надто швидко втрачає висоту або відхиляється від курсу — користувач отримує візуальне та аудіо-повідомлення з рекомендацією. Також реалізовано адаптивну систему повідомлень, що змінюється відповідно до обраного рівня складності або типу сценарію.

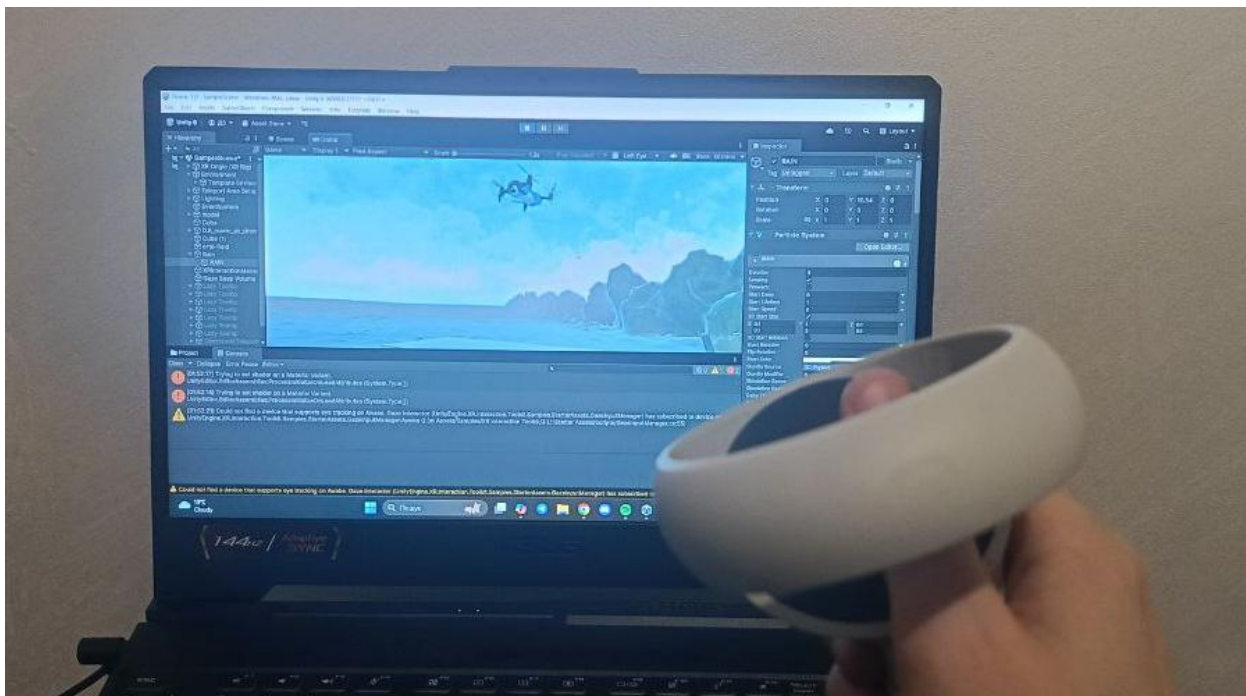


Рис.2.30. Приклад керуванням дроном

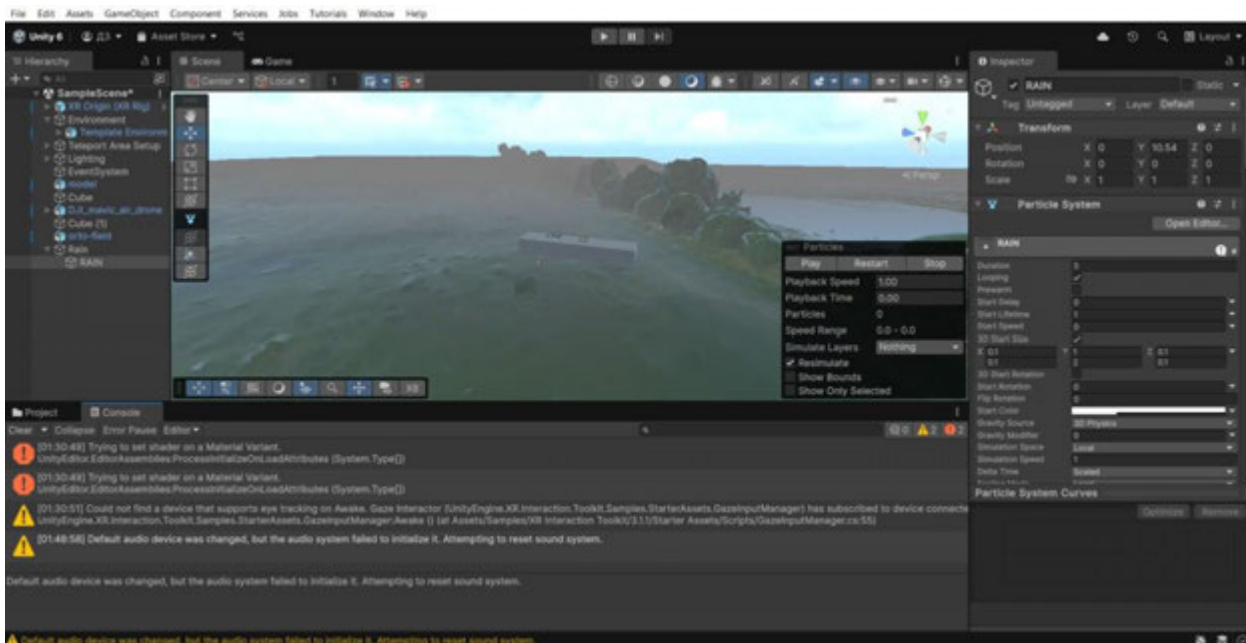


Рис.2.31. Система підказок

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк. 40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. *Агроспецифічний контекст інтерфейсу:*

Оскільки симулятор орієнтований на використання дронів у сільському господарстві, UI було адаптовано для цього сегменту. Серед особливостей — інтерфейс для сканування полів, позначення виявлених пошкоджень посівів, облік координат точок спостереження та можливість прив'язки даних до умовного аграрного завдання (наприклад, обліку ділянок зі зниженою вологістю або слідами шкідників).

6. *Інтеграція аграрних сценаріїв через Unity-сцену:*

У середовищі Unity були реалізовані кілька сценаріїв, які імітують завдання аграрного моніторингу. Користувач взаємодіє з UI не лише під час польоту, але й у підготовчому та аналітичному етапах — наприклад, вибір маршруту польоту, перегляд результатів виявлення, або створення звіту після польоту.

Таким чином, користувацький інтерфейс симулятора у середовищі Unity, адаптований до Oculus Quest 2 і створений з урахуванням аграрного призначення, є не просто інструментом візуалізації даних, а повноцінним навчальним інструментом. Він дозволяє користувачам без попереднього досвіду отримати реалістичне уявлення про управління дроном DJI Mavic 3 в умовах цифрового сільського господарства.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

В умовах воєнного та післявоєнного відновлення аграрного сектору України особливо актуальним стає застосування автономних дронів для автоматизації трудомістких процесів. Використання безпілотних літальних апаратів (зокрема DJI Mavic) дозволяє значно підвищити точність моніторингу посівів, стану ґрунтів і врожайності, зменшити потребу в ручній праці та забезпечити аграрну безпеку в зоні ризику. Проте впровадження таких технологій супроводжується низкою потенційних загроз, які потребують попереднього аналізу в безпечному цифровому середовищі.

Одним із підходів до мінімізації ризиків є створення інтерактивних VR/AR симуляторів в Unity, які дозволяють протестувати роботу дронів у реалістичних аграрних умовах без фізичного втручання. Такі моделі враховують реальний ландшафт, кліматичні зміни та змінні типи культур, характерні для територій центральної, південної чи східної України.

Ключові загрози при роботі з дронами в аграрній сфері та засоби їх моделювання в Unity

1. Фізичні ризики

- Зіткнення з об'єктами або людьми (через неправильне програмування маршруту або відсутність коректного розпізнавання перешкод).

Unity-сценарій: віртуальне моделювання руху дрона з фізикою колізій, симуляція аварій при втраті GPS-сигналу.

- Падіння на землю через пориви вітру, перегрів батареї або збій в алгоритмах стабілізації.

Unity-сценарій: тестування стабільності польоту при змінних метеоумовах, з урахуванням обмежень DJI Mavic.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Задорожній Д.			РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Несвідомін А.					42	
Н. Контр.					НУБіП України			
Затверд.								

2. *Електричні та технічні загрози*

- Короткі замикання через вологу (обробка полів може супроводжуватися туманом, конденсатом).

Unity-модель: симуляція дій в умовах дощу або обприскування з урахуванням параметрів IP-класу захисту.

- Несправності у системах енергоживлення, що призводять до аварійного завершення польоту.

Віртуальний сценарій: включення fail-safe протоколів у середовищі Unity з перевіркою поведінки при втраті живлення.

3. *Програмні збої*

- Помилки у комп'ютерному зорі: неправильне розпізнавання рослин, тварин або людей.

Застосування ML-модулів в Unity: навчання нейронних мереж для точного класифікування об'єктів (наприклад, відрізнення яблуні від перехожого).

- Загрози кібербезпеки — втручання в систему управління дроном.

Симуляція атак: створення сценаріїв несанкціонованого доступу в симуляторі для відпрацювання дій оператора у VR.

4. *Зовнішні та екологічні фактори*

- Погодні умови (вітер, туман) погіршують точність польоту та роботу сенсорів.

В Unity: створення динамічного середовища з погодними ефектами для стрес-тестування польотних алгоритмів.

- Присутність тварин або людей у зоні роботи дрона.

Сценарії виявлення загроз: інтеграція моделей виявлення руху та термозображення.

5. *Шум, вібрації, вплив на оператора*

- Постійне використання дрона викликає втоми оператора, особливо при довготривалому моніторингу.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Інтерфейс в Unity + Oculus Quest 2: створення зручного інтерфейсу керування дроном у VR-середовищі з підтримкою голосового управління та жестів.

Комплекс заходів безпеки та підготовки персоналу (Unity-імплементация)

✓ *Технічні рішення*

- Встановлення віртуальних зон безпеки в моделі (наприклад, з використанням Raycasting в Unity), де дрон автоматично зупиняється при виявленні об'єкта.

- Вбудовані датчики навантаження та балансування руху моделюються через фізичні компоненти Rigidbody.

- Віртуальні інструктажі з технічного обслуговування з покроковою анімацією заміни компонентів DJI Mavic 3.

✓ *Програмні рішення*

- Симуляція алгоритмів у середовищі ROS ↔ Unity через ROS# або Unity Robotics Hub.

- Інтеграція сценаріїв кіберзахисту: виявлення збоїв, перезапуск системи, шифрування даних (модельована логіка).

✓ *Організаційні заходи*

- Навчання операторів у VR: тренінги на базі Oculus Quest 2 — від звичайного польоту до екстрених ситуацій.

- Імітація реальних сценаріїв: ситуації збоїв GPS, втрати сигналу або появи стороннього об'єкта моделюються в Unity-симуляторі.

✓ *Індивідуальний захист*

- Віртуальна демонстрація використання ЗІЗ (шоломів, рукавичок, захисного одягу) у стилі AR-тренажера.

✓ *Екологічна відповідальність*

- Моделювання дронів на біоаккумуляторах, симуляція встановлення сонячних зарядних станцій у VR.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

- Розробка системи виявлення тварин у полі (на основі комп'ютерного зору), протестована у віртуальному просторі.

Аудит, стандарти і законодавча відповідність

Unity дозволяє симулювати відповідність стандартам ISO 10218 та ISO 13849 через створення інтерактивних чеклістів, аварійних сценаріїв та періодичного технічного аудиту. Такі симуляції допомагають краще підготувати фермерів та інженерів до впровадження роботизованих систем.

Також у VR можна реалізувати модуль RCA (аналіз причин інцидентів), де на прикладах симулюються технічні та людські помилки для подальшого навчання персоналу.

Психологічна адаптація та зниження стресу

Unity дозволяє створювати віртуальні простори психологічного розвантаження, які включають:

- Моделі природного середовища (наприклад, віртуальний сад або поле з ефектом занурення).
- Навчальні симуляції аварійних ситуацій без ризику — з метою розвитку впевненості у складних умовах.

Впровадження дронів у сільське господарство України має високий потенціал для відновлення аграрного сектору, особливо за рахунок поєднання Unity-симуляцій, реальних БПЛА, та VR-інструментів підготовки персоналу. Такий підхід дозволяє знизити ризики, скоротити витрати на тестування й уникнути пошкоджень техніки, забезпечуючи сталий розвиток та цифрову трансформацію українського села.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Вихідні дані:

1. Реальне навчання

Дрон DJI Mavic коштує приблизно 100 000 грн. Вартість амортизації — 10% за одне навчання (на 1 особу): 10 000 грн.

Ремонт після помилок новачків — в середньому 5 000 грн (пошкодження гвинтів, підшипників, корпусу).

Акумулятор на 45 хв польоту: кілька зарядок + електроенергія — 2 000 грн.

Інструктор — 400 грн/год × 10 год = 4 000 грн.

Страхові чи резервні витрати — 3 000 грн.

Транспорт до навчального полігону — 1 500 грн.

2. Віртуальне навчання

Витрати на VR обладнання, комп'ютер і розробку ПЗ — близько 150 000 грн. Якщо використовується на 10 операторів — по 15 000 грн/оператора (амортизація 1 раз/5 років або більше).

Зношування, страхування — немає.

Інструктор — лише перші години адаптації до інтерфейсу: 2 000 грн.

Електроенергія на ПК / VR — 300 грн на одного слухача на 10 год навчання.

4.1. Економічний ефект

Економія на одного оператора становить:

$$25\,500 \text{ грн} - 3\,800 \text{ грн} = 21\,700 \text{ грн}$$

При підготовці 10 операторів:

$$215\,000 \text{ грн економії загалом}$$

Витрати на розробку симулятора + VR-комплект:

$$\text{приблизно } 150\,000 \text{ грн (один раз)}$$

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Задорожній Д.			РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Несвідомін А.					46	
Н. Контр.					НУБіП України			
Затверд.								

Окупність — вже при підготовці перших 7 операторів.

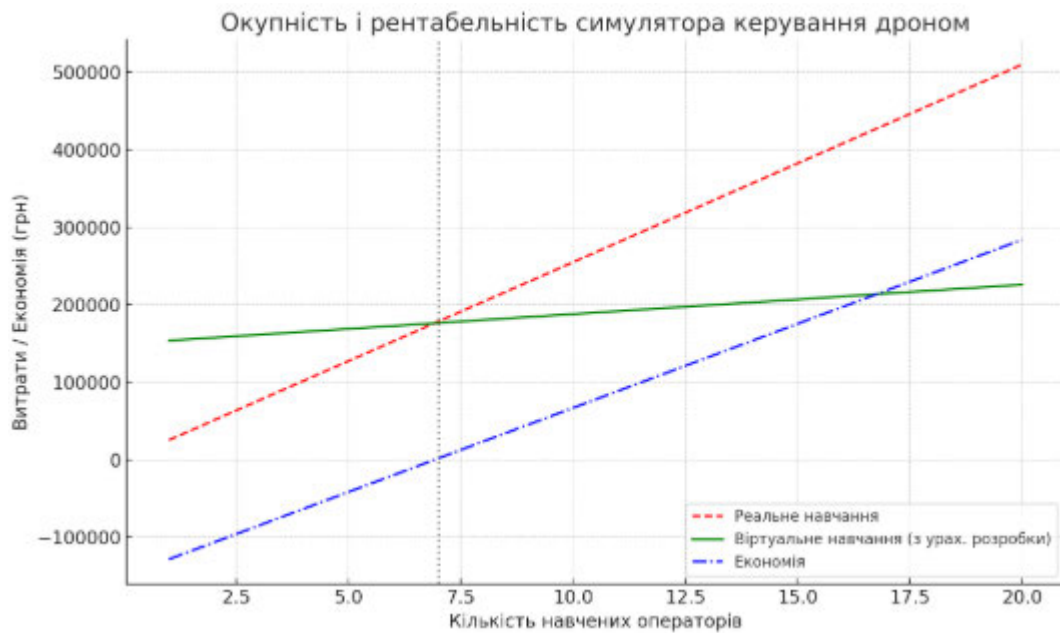


Рис.4.1. Графік економічної ефективності розробки віртуального симулятора керування дроном

- Червона лінія — витрати на реальне навчання операторів.
- Зелена лінія — витрати на віртуальне навчання з урахуванням розробки симулятора.
- Синя лінія — чиста економія (різниця між реальним і віртуальним навчанням).
- Сіра пунктирна лінія — точка окупності, де симулятор починає економити гроші.

4.2. Окупність за один рік

Загальні витрати на віртуальне навчання за рік:

$$150000(\text{симулятор}) + 15 \times 3800 = 150000 + 57000 = 207000 \text{ грн}$$

Загальні витрати на реальне навчання за рік:

$$15 \times 25500 = 382500 \text{ грн}$$

Економія за рік:

$$382500 - 207000 = 175500 \text{ грн}$$

Висновок:

Окупність за перший рік досягається повністю.

Уже в перший рік ви отримаєте економічний ефект у розмірі 175 500 грн, що на ~85% покриває витрати на симулятор.

Починаючи з 7-8 оператора, симулятор повністю окупається, а надалі — приносить чисту економію.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було розроблено функціональний віртуальний симулятор для навчання управлінню дроном DJI Mavic 3 у середовищі Unity з орієнтацією на аграрне застосування. Проведено детальний аналіз дронів, обґрунтовано вибір DJI Mavic 3 як найбільш придатної моделі для моделювання у віртуальному середовищі завдяки його технічним характеристикам, надійності та поширеності в Україні.

Сформовано математичну модель динаміки польоту дрона з урахуванням реальних фізичних факторів (гравітації, аеродинамічного опору, поривів вітру), а також реалізовано обробку керуючих сигналів за допомогою алгоритмів PID-регулювання. Завдяки цьому досягнуто реалістичного відтворення поведінки апарата у віртуальному середовищі.

Використання Unity дозволило забезпечити кросплатформеність, інтеграцію VR/AR, а також адаптацію під аграрні сценарії — обстеження полів, збирання NDVI-даних, перевірку систем зрошення. Проєкт також включав розробку інтерфейсу користувача, зручного як для новачків, так і для досвідчених пілотів. Особливу увагу було приділено моделюванню сценаріїв, характерних для післявоєнного відновлення аграрного сектору України.

У процесі тестування було підтверджено, що симулятор дає змогу ефективно формувати навички управління дроном без потреби у використанні реального обладнання, що знижує ризики, витрати та спрощує підготовку операторів.

Таким чином, розроблений симулятор є не лише навчальним інструментом, а й платформою для подальших досліджень у галузі точного

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Задорожній Д.			ВИСНОВКИ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		Несвідомін А.					49	
<i>Н. Контр.</i>						<i>НУБіП України</i>		
<i>Затверд.</i>								

землеробства, телеметрії, автономного керування та цифрової трансформації аграрного виробництва.

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

					01.04 – КР. 2265 “С” 2024.12.16. 069 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		Задорожній Д.					51	
<i>Перевір.</i>		Несвідомін А.						
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								
						НУБіП України		

