

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління

(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціалізовані комп'ютерні засоби для організації рою дронів з
використанням штучного інтелекту

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи СКСМ-23-2

Марченко В.І.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Спеціалізовані

комп'ютерні системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Кривуля Г.Ф.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри



(підпис)

Чумаченко С. В.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ Автоматизації проектування обчислювальної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 Комп'ютерна інженерія _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Спеціалізовані комп'ютерні системи _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____ Сукма _____
(підпис)

«_____» _____ 20 _____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Марченку Вадиму Ігоровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Спеціалізовані комп'ютерні засоби для організації рою дронів з використанням штучного інтелекту

затверджена наказом університету від 08 листопада 2024 р. № 1189 Ст.

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 22 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Аналітичні матеріали застосування роїв дронів _____

Технічна література структури організації рою дронів _____

Метод інтеграція ШІ в алгоритми керування дрону _____

Системи сенсорів і збору даних для рою дронів _____

Методи симуляції та тестування ройового інтелекту _____

Програмне забезпечення для управління роєм дронів _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Сфери застосування роїв ройових дронів _____

Програмне забезпечення для організації рою дронів _____

Методи та алгоритми керування над роєм дронів _____

Сенсори дронів для збору даних _____

Методи тестування роїв дронів

Безпекові та правові проблеми застосування роїв дронів

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) 21 слайд


6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)


Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів організації роїв дронів	09.11.2024 – 15.11.2024	Виконано
2	Визначення сфер застосування штучного інтелекту в роєвому інтелекті	15.11.2024 – 22.11.2024	Виконано
3	Формулювання постановки задачі	22.11.2024 – 26.11.2024	Виконано
4	Аналіз проблем використання спеціалізованих комп'ютерних засобів для організації рою дронів з використанням штучного інтелекту	26.11.2024 – 02.12.2024	Виконано
5	Аналіз технічних складових організації роїв дронів	02.12.2024 – 14.12.2024	Виконано
6	Визначення методів тестування та симуляції рою дронів	14.12.2024 – 19.12.2024	Виконано
7	Визначення перспектив розвитку роїв дронів	19.12.2024 – 27.12.2024	Виконано
8	Розробка переліку можливих проблем використання роїв дронів	27.12.2024 – 04.01.2025	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	04.12.2024 – 14.01.2025	Виконано
10	Оформлення графічних матеріалів	14.12.2024 – 15.01.2025	Виконано
11	Захист кваліфікаційної роботи	22.01.2025	

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач 
(підпис)

Керівник роботи  проф. Кривуля Г.Ф.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи містить 59 сторінок, 19 рисунків, 2 таблиці, 16 джерел за переліком посилань.

ДРОН, КООРДИНАЦІЯ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, МЕРЕЖЕВІ ПРОТОКОЛИ, ОБРОБКА ДАНИХ, ПЛАНУВАННЯ ПОЛЬОТІВ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, РІЙ, СЕНСОРИ, СИМУЛЯЦІЯ, СПЕЦІАЛІЗОВАНІ КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження спеціалізованих комп'ютерних засобів для організації рою дронів з використанням штучного інтелекту. Дослідження спрямоване на аналіз алгоритмів та програмного забезпечення, які забезпечать ефективну координацію та комунікацію між дронами, що дозволить уникнути зіткнень, дублювання завдань та неефективного використання ресурсів.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз труднощів, пов'язаних із координацією та комунікацією дронів при ручному управлінні, включаючи ймовірність зіткнень, дублювання завдань та неефективного використання ресурсів.

ABSTRACT

Qualification work contains 59 pages, 19 figures, 2 tables, 16 sources.

ALGORITHMS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, COMMUNICATION, COORDINATION, DATA PROCESSING, DRONE, FLIGHT PLANNING, MACHINE LEARNING, NETWORK PROTOCOLS, SENSORS, SIMULATION, SOFTWARE, SPECIALIZED COMPUTER TOOLS, SWARM.

The goal of the qualification work is to study specialized computer tools for organizing a swarm of drones using artificial intelligence. The research is aimed at analyzing algorithms and software that will ensure effective coordination and communication between drones, which will avoid collisions, duplication of tasks and inefficient use of resources.

In the course of the qualification work, the difficulties associated with the coordination and communication of drones under manual control were analyzed, including the possibility of collisions, duplication of tasks and inefficient use of resources.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РОЇВ ДРОНІВ	11
1.1 Сфери застосування роїв дронів	11
1.2 Перспективи розвитку технологій для рою дронів	15
2 АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ НАД РОЯМИ ДРОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	18
2.1 Архітектура спеціалізованих комп'ютерних засобів для організації рою дронів	18
2.2 Інтеграція ШІ в алгоритми керування над роєм дронів	19
3 ТЕХНІЧНІ СКЛАДОВІ ОРГАНІЗАЦІЇ РОЇВ ДРОНІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	22
3.1 Програмне забезпечення для управління роєм дронів	22
3.2 Мережеві технології для зв'язку та обміну інформацією в рої	25
3.3 Системи сенсорів і збору даних для рою дронів	27
3.4 Характеристика основних алгоритмів для керування роєм дронів з використанням ШІ	30
3.4.1 Алгоритми керування над роєм дронів за допомогою штучного інтелекту для автономної роботи рою	30
3.4.2 Централізована модель керування	33
3.4.3 Децентралізована модель керування	35
3.4.4 Ієрархічне управління в групах	37
3.4.5 Ройова модель керування	41
3.4.6 Гібридна модель керування	43
3.4.7 Рольове управління	45

4 МЕТОДИ ТЕСТУВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЇ РОЮ ДРОНІВ	48
4.1 Методи симуляції застосування ройового інтелекту	48
4.2 Методи тестування роїв дронів в реальних умовах	50
5 МОЖЛИВІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ РОЇВ ДРОНІВ	52
5.1 Безпекові проблеми застосування роїв дронів	52
5.1.1 Технічні уразливості	52
5.1.2 Кібератаки та злом	52
5.1.3 Безпека для людей та майна	53
5.2 Правові питання щодо застосування роїв дронів	54
5.2.1 Загроза приватності	54
5.2.2. Невизначеність у регуляторній сфері	54
5.2.3 Етичні проблеми та потенційне військове використання	55
ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	58

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ШІ – штучний інтелект

GPS – система глобального позиціювання

ROS – robot operating system

IEEE – стандарт комунікації в бездротовій локальній мережевій зоні

Ad-Hoc – бездротова мережа, яка формується безпосередньо між пристроями

Mesh – топологія сітчастої комп'ютерної мережі

BLE – протокол bluetooth low energy

MQTT – message queuing telemetry transport

DDS – data distribution service

U-Space – набір процедур для забезпечення доступу до повітряного простору

ІС – інформаційна система

ПЗ – програмне забезпечення

DoS – denial of service attack

ВСТУП

Сучасний стан комп'ютерних засобів для організації рою дронів характеризується значними досягненнями в області штучного інтелекту, сенсорних технологій та обчислювальної техніки. Системи управління роєм дронів на основі ШІ стають дедалі більш автономними і здатними виконувати складні завдання з мінімальним людським втручанням. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє дронам швидко адаптуватися до змін у навколишньому середовищі та приймати оптимальні рішення в реальному часі. Вдосконалення обчислювальної потужності та зниження вартості апаратного забезпечення також сприяють поширенню цих технологій.

Сьогодні рої дронів під керівництвом комп'ютера з ШІ застосовуються у різних сферах. У сільському господарстві дрони використовуються для моніторингу врожаю, обприскування полів та збору даних про стан рослин. У логістиці дрони забезпечують швидку доставку товарів, особливо в міських умовах, де традиційні транспортні засоби можуть бути менш ефективними. Рятувальні операції часто використовують рої дронів для пошуку та порятунку людей у важкодоступних районах або в умовах природних катастроф. У військовій сфері рої дронів виконують завдання розвідки, патрулювання та навіть атак на ворожі цілі.

Світові тенденції щодо використання ШІ в сфері організації рою дронів свідчать про постійне зростання цікавості до цієї технології. Провідні країни активно інвестують у дослідження та розробку нових алгоритмів і систем для управління дронами. Основними напрямками розвитку є підвищення автономності дронів, удосконалення технологій комунікації між дронами та покращення їхньої здатності до самонавчання й адаптації.

Актуальність та підстави для аналізу і розробки спеціалізованих комп'ютерних засобів на основі ШІ для керування роєм дронів полягають у

необхідності вирішення комплексних завдань, таких як пошукові операції, догляд за врожаєм чи тваринами, а також військова справа, що вимагають високої точності та швидкості виконання, які й може забезпечити ШІ. Військові та рятувальні операції, де часто виникає необхідність роботи в небезпечних умовах із серйозними обмеженнями в часі можуть значно виграти від впровадження таких технологій. Розвиток міської інфраструктури та зростання кількості населення також створюють попит на нові логістичні рішення, де дрони можуть відігравати ключову роль.

Загалом, спеціалізовані комп'ютерні засоби для організації рою дронів з використанням ШІ мають величезний потенціал у різних сферах життя та діяльності людини. Постійний розвиток технологій, підвищення їхньої доступності та зростання цікавості до нових способів вирішення сучасних проблем роблять цю область однією з найперспективніших у сфері інновацій.

1 СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РОЇВ ДРОНІВ

1.1 Сфери застосування роїв дронів

БПЛА – це дуже технологічні апарати, якими керує мікропрограма замість екіпажу, а їхній розмір може варіюватися від двох сантиметрів до понад 40 метрів. Технології роїв БПЛА дозволяє координувати роботу навіть настільки різних дронів, щонайменше від трьох, а іноді й тисячі апаратів одночасно. Рій дронів здатен виконувати спільні завдання з мінімальною потребою в людському контролі. Наприклад, рій безпілотників може ефективно допомагати у боротьбі з лісовими пожежами, оцінювати збитки, знаходити точки доступу і гасити вогонь, розпилюючи протипожежну рідину – все це з незначним втручанням людини. Так само рої дронів можуть поливати рослини, шукати зниклих людей та проводити шпигунські операції для військових – достатньо лише підібрати дрони за кількістю, розміром, часом роботи та технологіями.

Рої дронів можуть бути більш ефективними та надійними для певних задач, оскільки здатні виконувати різноманітні завдання одночасно без постійного нагляду. Вони також можуть продовжувати функціонувати навіть якщо окремі дрони виходять з ладу, так як кожен з дронів має не лише ройовий інтелект, а й свій власний алгоритм пошуку цілей, визначення траєкторії та модуль GPS.

Так використання великої кількості дронів за допомогою рою може значно зменшити час виконання поставленої перед ними задачі. На рисунку 1.1 зображено маршрут, який пройде один дрон для складання мапи периметру та маршрут, необхідний для рою з трьох дронів. Використання всього трьох дронів зменшує час виконання цієї задачі на 64%.

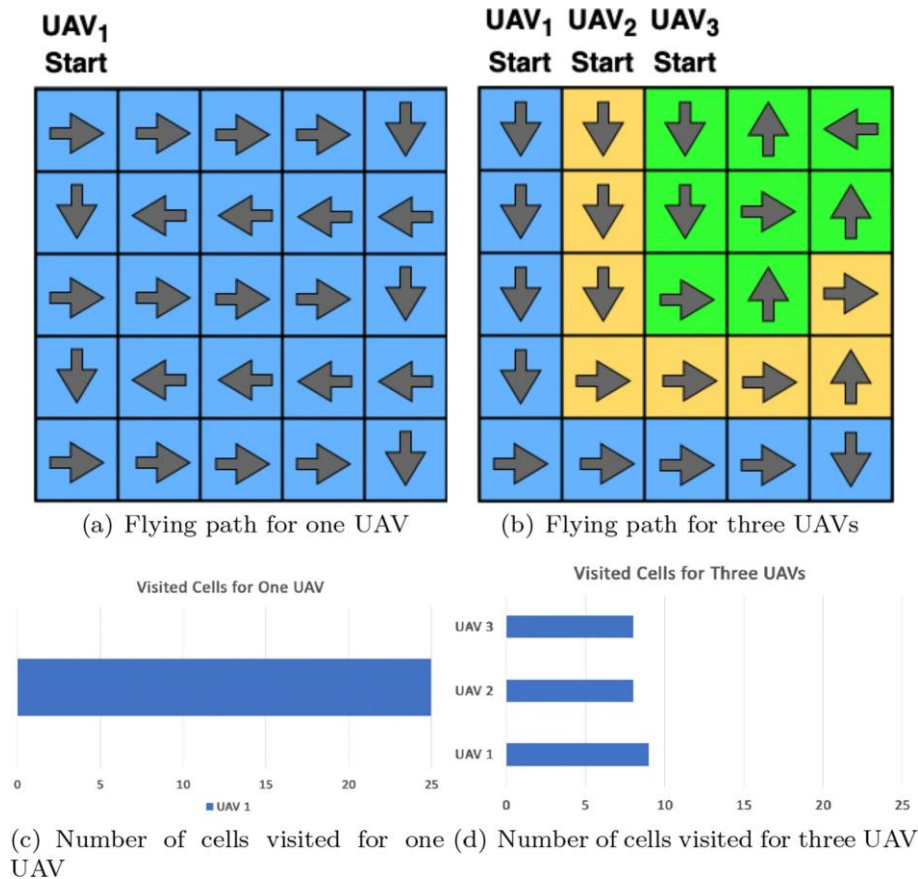


Рисунок 1.1 – Порівняння шляху та часу виконання задачі “складання мапи території” для окремого дрону та рою з трьох дронів

Рої дронів використовують передові комп’ютерні алгоритми разом з локальними технологіями зондування та зв’язку для синхронізації роботи багатьох дронів з метою досягнення спільної мети. Рої можуть застосовувати різні методи командування та управління, включаючи заздалегідь запрограмовані місії з визначеними траєкторіями польоту, централізоване управління з наземної станції або головного дрона, а також розподілене керування, коли дрони взаємодіють та співпрацюють на основі спільної інформації. Найбільш прогресивні методи контролю включають 5 ройовий інтелект, натхненний колективною поведінкою колоній комах і зграй птахів, а також методи штучного інтелекту, які дозволяють рою дронів адаптуватися до нових або несподіваних ситуацій.

Основні напрямки, в яких ведеться робота над застосування ШІ в організації рою дронів представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Области використання роїв дронів з використанням ШІ та можливості роїв дронів в цих областях

Сфера застосування	Опис можливостей	Статус
Сільське господарство	<ul style="list-style-type: none"> – моніторинг стану посівів, виявлення хвороб і паразитів; – автоматизована висадка сільськогосподарських культур і нанесення добрив; – патрулювання і моніторинг великих сільськогосподарських площ. 	Вже використовується
Лісове господарство	<ul style="list-style-type: none"> – виявлення та моніторинг лісових пожеж; – відслідковування лісових ділянок для запобігання незаконній рубці; – моніторинг змін у рослинному покриві та біорізноманітті. 	Досліджується
Містобудування та міське планування	<ul style="list-style-type: none"> – візуальний моніторинг міських інфраструктурних об'єктів (дороги, мости, будівлі); – забезпечення безпеки в міських зонах (нагляд за толпами, виявлення неполадок на дорогах); – доставка медичних препаратів або важливих предметів в ускладнених умовах. 	Проводяться тести

Кінець таблиці 1.1.

Сфера застосування	Опис можливостей	Статус
Надзвичайні та рятувальні операції	<ul style="list-style-type: none"> – швидка доставка першої медичної допомоги на віддалених територіях; – відслідковування зниклих людей у важкодоступних районах; – моніторинг стихійних лих (пожежі, повені, землетруси). 	Вже використовується
Доставка та логістика	<ul style="list-style-type: none"> – автономна доставка товарів в місця зі складним доступом; – оптимізація маршрутів доставки для зменшення часу та витрат. 	Проводяться тести
Наукові дослідження	<ul style="list-style-type: none"> – відслідковування міграційних маршрутів тварин; – моніторинг змін клімату та впливу на природні екосистеми. 	Досліджується
Розваги	<ul style="list-style-type: none"> – використання дронів для проведення аеріальних шоу і свят; – зменшення екологічного впливу порівняно з традиційними піротехнічними шоу. 	Вже використовується

Таким чином, з удосконаленням технології керування ройових дронів, її можна буде використовувати для протидії лісовим пожежам, виявлення захворювань культур, їх поливу та ще багатьох інших цілей.

1.2 Перспективи розвитку технологій для рою дронів

Перспективи розвитку технологій для рою дронів охоплюють декілька ключових напрямів, які мають потенціал для значного вдосконалення функціональності та ефективності роїв у різних сферах застосування.

Одним із напрямів вдосконалення технологій для рою дронів є покращення автономності дронів, що включає розвиток більш точних і адаптивних алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання. Такі алгоритми дозволять дронам приймати самостійні рішення, швидко адаптуватися до змін у навколишньому середовищі та виконувати складні завдання з мінімальним людським втручанням. Це може бути особливо корисним для рятувальних операцій, досліджень важкодоступних місць і операцій в умовах, небезпечних для людини.

Іншим перспективним напрямом є розвиток ефективних комунікаційних технологій, які забезпечують надійний зв'язок у великих роєвих системах. Зокрема, вдосконалення бездротових протоколів, таких як Mesh і Ad-Hoc[16], дозволить підтримувати стійкий зв'язок між великим числом дронів навіть на великих відстанях і в умовах обмеженого доступу до мережі. Інтеграція технологій 5G та, у майбутньому, 6G також обіцяє збільшити пропускну здатність та знизити затримки передачі даних, що дозволить дронам обмінюватися інформацією ще швидше й ефективніше.

Результат застосування MESH-технології для рою дронів наведено на рисунку 1.2.

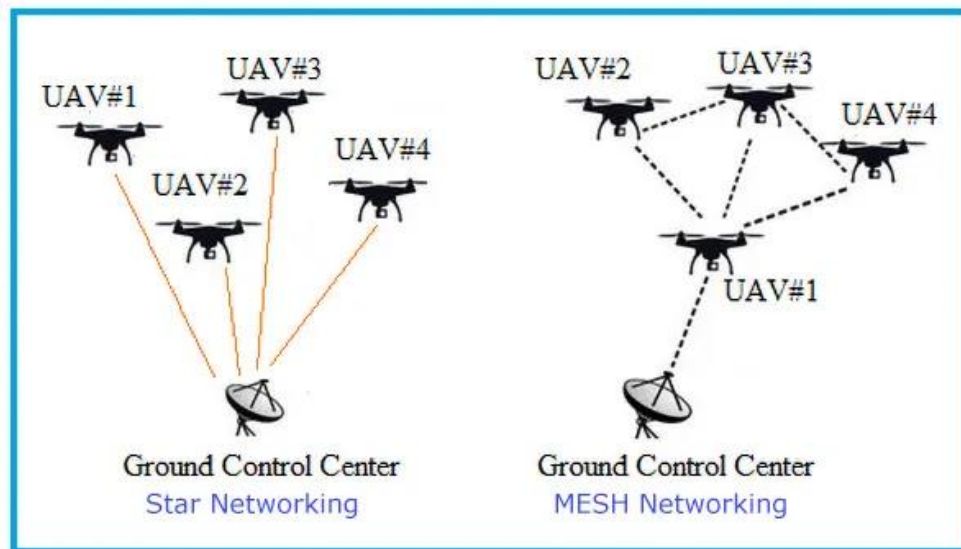


Рисунок 1.2 – Застосування Mesh-технології для об'єднання дронів у єдину групу, що спрощує передачу даних між БПЛА

Сенсорні технології, зокрема, розвиток компактних і високоточних сенсорів, також сприятимуть вдосконаленню роїв дронів. Модернізація камер, систем розпізнавання образів і датчиків навігації дозволить дронам краще орієнтуватися у складних середовищах, уникати перешкод та працювати в умовах обмеженої видимості. Крім того, розвиток технологій доповненої реальності та симуляційних середовищ сприятиме більш ефективному тестуванню роїв, дозволяючи моделювати різні сценарії та вдосконалювати алгоритми.

Ще однією перспективою є підвищення енергоефективності дронів, зокрема розробка нових типів акумуляторів і систем економії енергії, що дозволить дронам працювати довше без підзарядки. Ведуться дослідження щодо використання сонячної енергії та бездротових систем заряджання, що могло б значно збільшити автономність рою в польових умовах.

Узгодження та інтеграція роїв дронів у систему повітряного простору також стає важливою перспективою, оскільки збільшення кількості роїв у повітрі вимагає розробки стандартів і регламентів для забезпечення безпеки й ефективного управління. Використання автоматизованих систем управління

повітряним рухом для дронів, подібних до концепції U-Space в Європі, може сприяти цьому, дозволяючи роям інтегруватися в загальну систему повітряного простору.

2 АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ НАД РОЯМИ ДРОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

2.1 Архітектура спеціалізованих комп'ютерних засобів для організації рою дронів

Архітектура спеціалізованих комп'ютерних засобів для організації рою дронів має багаторівневу структуру, яка забезпечує ефективну координацію та автономність роботи.

На базовому рівні архітектури БПЛА знаходиться апаратна частина кожного дрона, що включає центральний процесор, блок пам'яті та мережевий модуль, які забезпечують обробку локальних даних, виконання алгоритмів штучного інтелекту та підтримку зв'язку з іншими дронами. Вбудовані сенсори, такі як GPS, камери, інерційні та ультразвукові датчики, надають дрону інформацію про його місцезнаходження та обстановку навколо. Основні сенсори та датчики на дроні зображені на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Основні компоненти окремого БПЛА

Наступний рівень архітектури включає програмні компоненти, які реалізують ключові алгоритми ШІ, обробку даних та комунікаційні протоколи. Програмне забезпечення дозволяє дронам динамічно змінювати маршрути, уникати зіткнень та взаємодіяти з іншими дронами в реальному часі. Окремо реалізуються алгоритми машинного навчання, які аналізують і адаптують поведінку рою до змін середовища, зокрема в умовах нестабільного зв'язку чи обмеженого огляду.

На рівні зв'язку архітектура передбачає спеціалізовані протоколи для обміну даними між дронами, що дозволяє рою функціонувати як єдина система. Використовуються бездротові мережі та методи обробки даних, які дозволяють швидко передавати інформацію і забезпечувати синхронізацію між дронами. Для роїв великої кількості дронів може застосовуватись централізована або частково децентралізована модель управління, в якій окремий дрон або сервер виступає як координатор та обробляє інформацію для узгодження завдань.

Таким чином, архітектура спеціалізованих комп'ютерних засобів для рою дронів поєднує апаратні та програмні компоненти, орієнтовані на розподілене виконання завдань, зв'язок та інтеграцію алгоритмів штучного інтелекту для високоефективної і стабільної роботи рою в різних умовах.

2.2 Інтеграція ШІ в алгоритми керування над роєм дронів

Інтеграція штучного інтелекту у керування роєм дронів передбачає створення складної архітектури, яка може бути централізованою або децентралізованою. У централізованому підході один дрон або наземний сервер виконує роль координатора, передаючи команди всьому роєві. У децентралізованому підході кожен дрон працює автономно, але активно обмінюється інформацією з іншими дронами для забезпечення злагодженості дій.

Алгоритми, що використовуються для керування роєм, базуються на принципах оптимізації, машинного навчання, планування траєкторій та координації. Наприклад, алгоритми роїнгової поведінки, такі як моделі зграї птахів чи колонії мурах, допомагають роєві адаптуватися до змін середовища та ефективно досягати цілей.

Нейронні мережі, глибоке навчання та підкріплювальне навчання дозволяють дронам аналізувати сенсорну інформацію, розпізнавати об'єкти та ухвалювати оптимальні рішення. Для планування траєкторій використовуються алгоритми пошуку шляху, які враховують динамічні умови та перешкоди. Координація між дронами реалізується через алгоритми злагодженої поведінки, що забезпечують дотримання відстаней, напрямку та швидкості, а також через сценарії, де один або кілька дронів виступають лідерами.

Для забезпечення ефективності роботи рою важливу роль відіграють сенсори та платформи на основі інтернету. GPS, камери, LIDAR, сенсори висоти та інші вимірювальні пристрої забезпечують збір і обробку інформації про середовище. Дрони комунікують між собою та з наземними серверами за допомогою бездротових протоколів, таких як 5G, що дозволяє передавати дані з мінімальними затримками. ШІ також відповідає за динамічний розподіл завдань між дронами залежно від їхньої позиції, ресурсу батареї або ситуаційних потреб. Якщо один з дронів виходить з ладу, система адаптує дії рою для компенсації втрат. Приклад такої заміни зображено на рисунку 2.2 нижче.

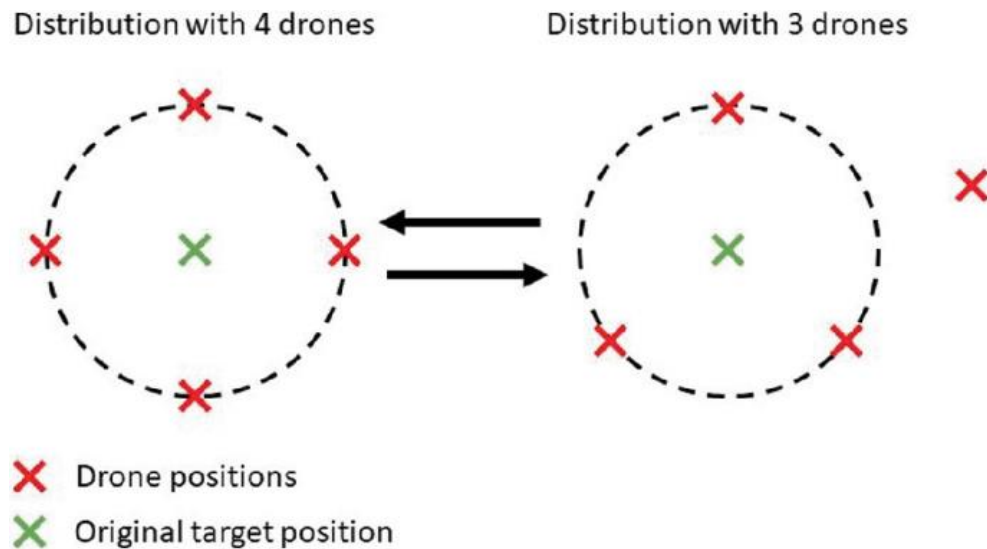


Рисунок 2.2 – Позиціонування дронів у групі в разі втрати з'єднання з одним із дронів

Практичне застосування таких систем включає пошуково-рятувальні операції, моніторинг сільськогосподарських угідь, перевірку інфраструктури та військові завдання. У рятувальних операціях дрони сканують територію для виявлення людей, у сільському господарстві аналізують стан полів, а в інфраструктурному моніторингу забезпечують оцінку стану мостів чи ліній електропередач.

Проте, на зважаючи на значний потенціал у порівнянні з ручним керуванням, інтеграція ШІ в якості керівника над роєм дронів стикається з проблемами. До таких проблем можна віднести високе енергоспоживання, необхідність забезпечення надійного зв'язку, загрози кібератак і складнощі масштабування системи для великих роїв.

3 ТЕХНІЧНІ СКЛАДОВІ ОРГАНІЗАЦІЇ РОЇВ ДРОНІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

3.1 Програмне забезпечення для управління роєм дронів

Сучасні системи для організації рою дронів включають як комерційні, так і дослідницькі платформи, що використовують передові алгоритми і технології для забезпечення координації та ефективною взаємодії між безпілотними літальними апаратами. Однією з провідних систем є програмне забезпечення від компанії DJI, що пропонує комплексні рішення для управління дронами, включаючи інтеграцію з сенсорами і системами зв'язку [1]. Інша відома система, Parrot ANAFI, використовує передові технології для координації польотів та виконання складних завдань в реальному часі [2].

Системи, що використовують штучний інтелект, мають значні переваги у порівнянні з традиційними методами. Одним з яскравих прикладів є проект Intel's Drone Light Shows [3], де ШІ допомагає синхронізувати сотні дронів для створення вражаючих світлових шоу. Інша система, Skydio [4], використовує ШІ для автономного керування дронами, дозволяючи їм уникати перешкод і слідкувати за рухомими об'єктами з високою точністю. У військовій сфері проект Perdix від DARPA демонструє, як рій дронів з ШІ [5] може виконувати розвідувальні та патрульні місії, адаптуючись до змінних умов на полі бою.

Використання штучного інтелекту в системах управління роєм дронів дає суттєві плюси. По-перше, ШІ забезпечує високий рівень автономності, що дозволяє дронам самостійно приймати рішення на основі аналізу даних з сенсорів. Це зменшує потребу в постійному контролі з боку людини і підвищує ефективність виконання завдань. По-друге, алгоритми машинного навчання дозволяють дронам адаптуватися до нових ситуацій і умов, що є критично важливим у динамічних середовищах, таких як рятувальні операції чи військові місії. По-третє, ШІ допомагає оптимізувати маршрути польотів,

зменшуючи витрати енергії і час виконання завдань, що є важливим для комерційного використання, наприклад, у логістиці чи сільському господарстві.

Такі системи також демонструють високу надійність і точність завдяки здатності ШІ обробляти великі обсяги даних в реальному часі, що забезпечує швидке виявлення і реагування на потенційні загрози або перешкоди. Впровадження ШІ в системи управління роєм дронів сприяє підвищенню безпеки польотів і зменшенню ризику зіткнень. У дослідницьких проектах, таких як SwarmLab від університету ETH Zurich [6], використовуються передові методи ШІ для вивчення поведінки роїв мікро-роботів і розробки нових алгоритмів координації, що має великий потенціал для майбутнього розвитку цієї технології. Зовнішній вигляд одного мікро-робота з рою зображено на рисунку 3.1.

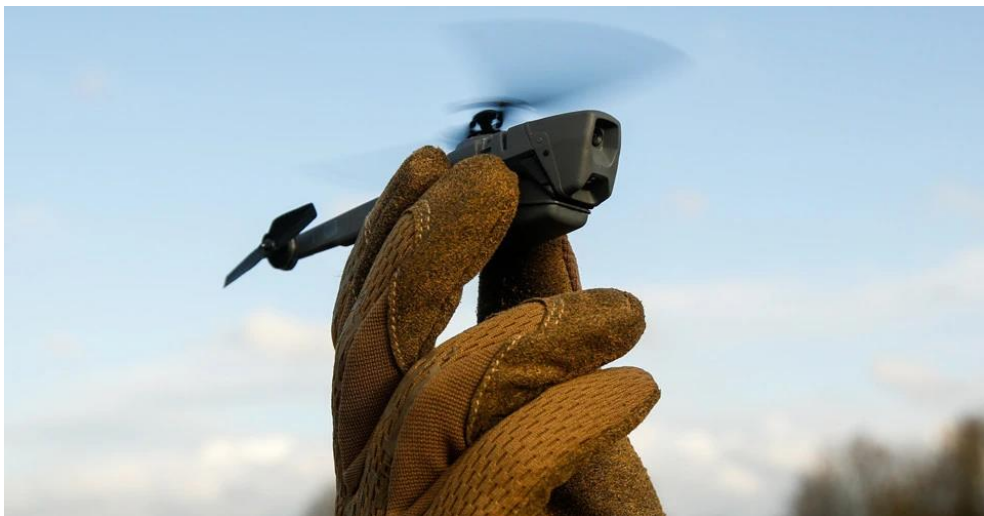


Рисунок 3.1 – Мікро-дрон, розроблений для військових цілей розвідки

Загалом, інтеграція штучного інтелекту в системи організації рою дронів відкриває нові можливості для автоматизації і підвищення ефективності виконання завдань у різних сферах, від розваг до рятувальних операцій і військових місій. Це забезпечує не лише підвищення продуктивності, але й

зменшення витрат і ризиків, пов'язаних з використанням безпілотних літальних апаратів.

Наразі вже розроблено багато програмних середовищ для організації роїв дронів з використанням ШІ. Приклади та опис плюсів таким середовищ наведено в таблиці 3.1 [7].

Таблиця 3.1 – Приклади та переваги середовищ для організації роїв дронів

Назва середовища	Переваги
Robot Operating System	ROS – це потужна платформа для розробки робототехнічних програм, включаючи системи керування роєм дронів. Вона підтримує широкий спектр датчиків і алгоритмів, включаючи компоненти штучного інтелекту
MATLAB та Simulink	MATLAB та Simulink надають потужні інструменти для моделювання, симуляції та реалізації алгоритмів штучного інтелекту для керування роєм дронів. Вони дозволяють швидко прототипувати та валідувати алгоритми.
PX4 Autopilot	PX4 – це платформа з відкритим кодом для автопілотів дронів, яка підтримує розгортання алгоритмів штучного інтелекту. Вона пропонує широкі можливості налаштування і інтеграції для різних дронів.
DJI SDK	SDK від DJI надає зручний інтерфейс для розробки програмного забезпечення, яке керує роєм дронів. Вона підтримує використання штучного інтелекту для автономного польоту та інших завдань.

Наведені вище програмні середовища дозволяють розробникам інтегрувати різноманітні алгоритми штучного інтелекту для автономного

керування роєм дронів, що робить їх ідеальними для застосувань у таких галузях, як агротехнології, логістика та надзвичайні ситуації.

Кожне з цих програмних середовищ має свої унікальні переваги, такі як підтримка відкритих стандартів (ROS, PX4), потужність інструментів для моделювання і аналізу (MATLAB/ Simulink), або спеціалізовані можливості для певних типів дронів (DJI SDK), тож вибір середовища, що підходить більш всього, залежить від конкретних вимог та поставлених задач для рою дронів.

3.2 Мережеві технології для зв'язку та обміну інформацією в рої

Мережеві технології для зв'язку та обміну інформацією в рої дронів забезпечують синхронізацію, координацію руху і взаємодію між дронами в реальному часі. Основою для цього слугують бездротові протоколи зв'язку, серед яких найчастіше використовуються Wi-Fi та спеціалізовані протоколи на основі IEEE 802.11 для високошвидкісного обміну даними на середніх дистанціях.

Для організації рою у великих масштабах популярним вибором стають Ad-Hoc мережі, які дозволяють дронам встановлювати прямий зв'язок один з одним без необхідності в центральному вузлі, створюючи мережу типу “точка-точка”. Така структура зв'язку дозволяє кожному дрону діяти як вузол мережі, через який передаються дані для забезпечення стабільності в рої навіть при значному його масштабі або втраті окремих дронів. Приклад роботи даної мережі зображено на рисунку 3.2.

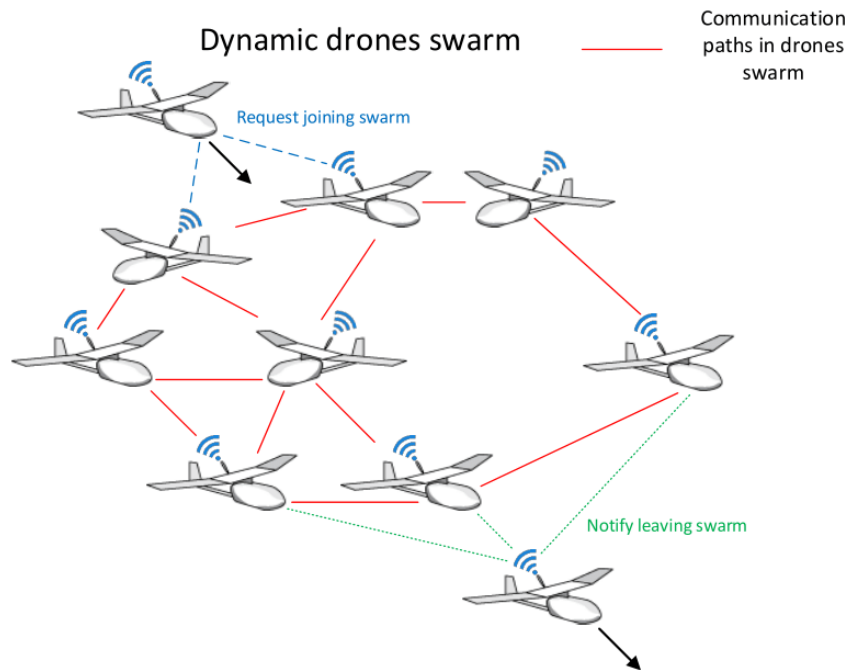


Рисунок 3.2 – Мережа передачі повідомлень у Ad-Нос мережі дронів

Завдяки Mesh-технології рій дронів підтримує ефективний і стійкий зв'язок, оскільки кожен дрон одночасно передає й отримує дані від інших, автоматично налаштовуючи маршрути в разі зміни положення або виходу з ладу окремих елементів. Також застосовуються технології, засновані на BLE, який підходить для короткочасного обміну невеликими обсягами інформації, наприклад, для періодичної синхронізації координат у мініатюрних роях.

На додаток, для обміну інформацією в рої використовуються спеціалізовані протоколи для уникнення перевантаження каналу і зменшення затримок у передачі даних. Протоколи MQTT та DDS дозволяють передавати повідомлення між дронами з низькою затримкою, що критично важливо для забезпечення швидкої реакції рою на зміну умов. Протоколи зв'язку також можуть включати алгоритми шифрування, які захищають дані від несанкціонованого доступу, забезпечуючи безпечну передачу інформації.

Загалом, мережеві технології, використовувані в рої дронів, створюють стабільну та гнучку систему зв'язку, що дозволяє ефективно обмінюватися

інформацією в реальному часі і підтримувати динамічну взаємодію дронів для виконання складних завдань в умовах непередбачуваних змін.

3.3 Системи сенсорів і збору даних для рою дронів

Кожен з видів ройових дронів обладнується різними сенсорами, що відкриває можливості для забезпечення автономного керування, стабільності польоту, навігації та виконання різних завдань, таких як уникнення перешкод, картографування та взаємодія між декількома дронами. Кожен тип сенсора виконує унікальні функції, і їх поєднання дозволяє дрону адаптуватися до умов реального світу та працювати з високою точністю. Нижче наведено детальний опис основних сенсорів, що необхідні для роботи самого дрону та запровадження можливості його взаємодії з іншими дронами в зграї.

Гіроскопи та акселерометри є частиною інерційної вимірювальної системи, яка відповідає за рух та орієнтацію дрона в просторі. Гіроскопи відповідають за вимірювання кутових швидкостей (як швидко дрон обертається навколо своїх осей), тоді як акселерометри вимірюють лінійне прискорення (зміни швидкості та напрямку). Завдяки цим сенсорам, дрон може визначати кут власного нахилу в просторі, швидкості обертання або прискорення та здійснювати корекцію польоту, щоб залишатися стабільним. Наприклад, під час різких маневрів або при сильному вітру ці сенсори дають можливість зберігати рівновагу та стабільність у польоті. Отримані від цих сенсорів дані використовуються в алгоритмах контролю для коригування положення дрона в реальному часі.

Система GPS виступає одним із ключових сенсорів, чийм основним завданням виступає забезпечення здатності дрона точно слідувати за заданим маршрутом і повертатися до базової станції в разі необхідності. Для рою дронів GPS дозволяє координувати місце розташування всіх апаратів, що є критичним для узгоджених польотів. Так як дрони, зазвичай, мають невеликий розмір та вагу, а також розвивають велику швидкість – координація усього

рою є найважливішою задачею, адже щільність початкового розміщення дронів після запуску може бути дуже високою і може стати причиною зіткнення. Зображення розміщення у повітрі рою БПЛА можна побачити на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Щільність розміщення БПЛА в рої одразу після розгортання

Однак сам модуль GPS має одну значну проблему при застосуванні – в закритих просторах або під землею, де сигнал супутників обмежений чи зовсім недоступний, GPS перестає бути сенсором навігації в просторі та заміщується такими сенсорами дрона, як камери чи інерційні системи. Вищеназвані камери дрона відносяться до візуальних сенсорів, які забезпечують дрон можливістю “бачити” навколишнє середовище. По своїй структурі камери можуть бути як звичайними (кольоровими), так і інфрачервоними для роботи в умовах поганої освітленості. Камери, в основному, використовуються для пошуку та розпізнавання об’єктів й створення візуальних карт [8]. Камери використовуються в модулі керування, за допомогою технологій комп’ютерного зору можна уникати перешкод, аналізуючи зображення в реальному часі та визначаючи потенційні загрози на шляху польоту. У

випадку роботи з роями дронів, камери можуть використовуватися для відстеження позицій інших дронів у полі зору, що дозволяє уникати зіткнень іншими дронами, навіть якщо сусідні дрони не бачать загрози зіткнення чи не оснащені модулем розпізнавання об'єктів [9].

Опціональними, але не менш важливими в певних обставинах сенсорами, виступають лазери, ультразвукові та інфрачервоні сенсори.

Лідар (активний далекомір оптичного діапазону) використовує лазерні промені для вимірювання відстані до об'єктів у навколишньому середовищі. Лідар випромінює лазерний імпульс і фіксує час його повернення після відбиття від об'єкта. На основі цих даних створюється тривимірна модель місцевості [10].

Ультразвукові сенсори функціонують за принципом ехолокації, подібно до того, як це роблять кажани, що дозволяє дронам оцінювати відстань до найближчих перешкод. Інфрачервоні сенсори використовують теплові випромінювання для виявлення об'єктів або перешкод, що знаходяться поблизу дрона. Вони можуть використовуватися для уникнення перешкод і створення теплових карт.

Для взаємодії з іншими дронами в рої використовуються комунікаційні сенсори (Wi-Fi, радіочастотні модулі) [11]. Комунікаційні сенсори дозволяють дрону обмінюватися даними з наземними станціями або іншими дронами. Наприклад, радіочастотні модулі або Wi-Fi-системи забезпечують зв'язок між дроном і оператором, передаючи дані про його стан, позицію та виконання завдань. Для роїв дронів такі сенсори дозволяють дронам обмінюватися інформацією один з одним, що є критичним для узгоджених дій і уникнення зіткнень.

Таким чином, кожен тип сенсора виконує специфічні функції, і їхня інтеграція забезпечує можливість автономного польоту, навігації, уникнення перешкод та виконання складних завдань у різних умовах. Використання кількох типів сенсорів дозволяє дронам адаптуватися до мінливих умов і забезпечувати надійну роботу навіть у складних середовищах.

3.4 Аналіз алгоритмів керування над роями дронів

3.4.1 Алгоритми керування над роєм дронів за допомогою штучного інтелекту для автономної роботи рою

З розвитком дронів розвивається і технологія керування цими дронами. Наразі існує багато різних методів керування й реалізовано вже багато алгоритмів роботи ройового інтелекту, але, загалом, для керування над роями дронів, можна виділити три основні категорії моделей координації: централізована модель, децентралізована модель та само організована модель [12, 13]. Різницю у принципі функціонування кожної з категорій моделей координації над роєм дронів можна побачити на рисунку 3.4.

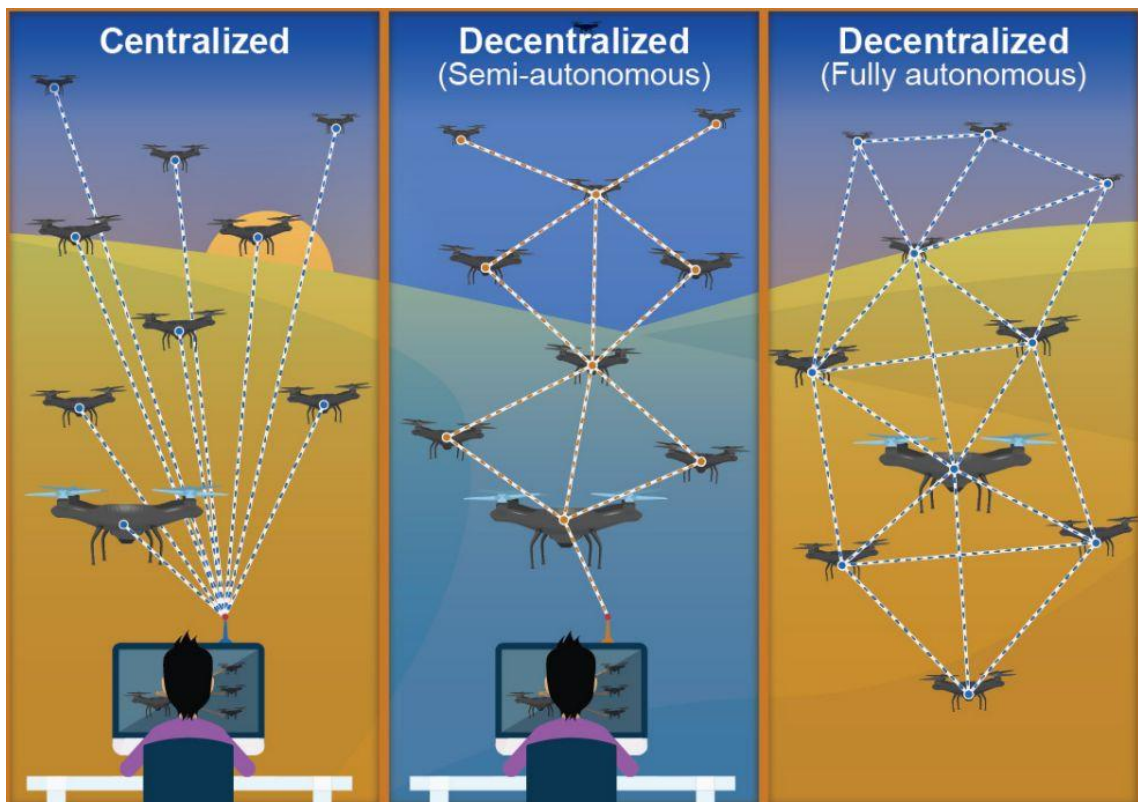


Рисунок 3.4 – Три основні категорії моделей керування над роями дронів

Централізована модель складається з одного головного дрона (координатора або матки) та рою підлеглих йому дронів. Координатор відповідає за керування всіма аспектами рою дронів. Він приймає рішення щодо маршрутів, завдань, управління енергією та сам доповідає результати та стан місії. Приклад такої моделі зображено на рисунку 3.5.

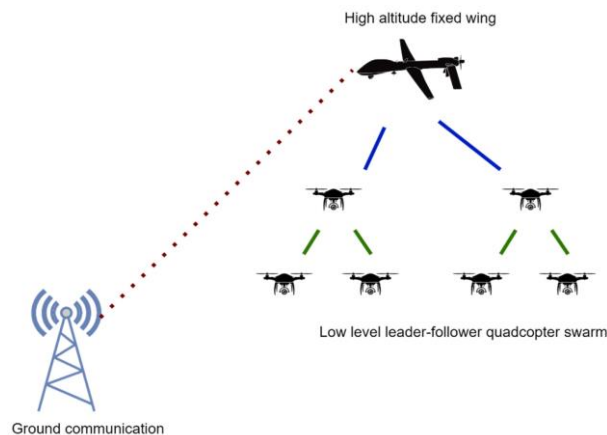


Рисунок 3.5 – Висотний БПЛА, що забезпечує підключення до групи дронів на низькій висоті, організованих у ще одну ієрархічну централізовану модель з власним дроном-маткою

Децентралізована модель розділяє рій на групи. Групи можуть складатись з різної кількості дронів, залежно від характеру місії, що виконується. В цій моделі для кожної групи обирається один чи декілька лідерів. Лідер може визначати маршрути, розподіляти завдання та координувати дії інших дронів. Інші дрони займають роль слідкуючого. Ці дрони слідуєть за лідером та виконують його команди. Вони можуть відстежувати рухи лідера та адаптувати свої дії відповідно до команд лідера та власної позиції.

В само організованій моделі дрони працюють як частина колективу, взаємодіючи один з одним для досягнення спільної мети без централізованого керівництва. Кожен дрон виконує різні задачі, такі як стимулювання, зондування, вирішення конфліктів тощо, для координації своїх дій та дій

дронів поблизу. Приклад передачі даних в цій моделі зображено на рисунку 3.6.

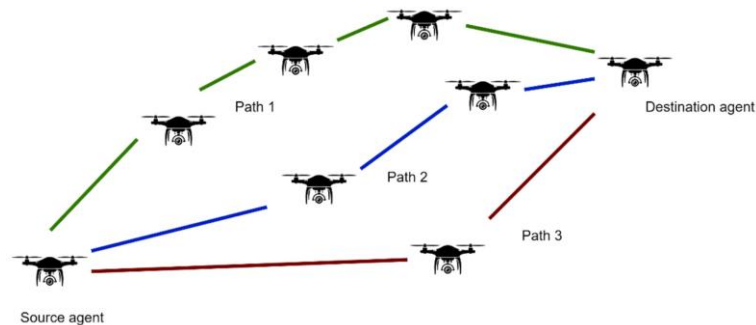


Рисунок 3.6 – Шляхи передачі даних в само організованій моделі з кількома стрибками переадресації, який використовується для передачі даних дрону, що знаходиться далі за всіх

Слід також зазначити, що для кожної із стратегій координації над дронами, важливою вимогою є уникнення централізованого управління, що веде до експоненціального збільшення необхідної пропускної спроможності зв'язку та складності програмного забезпечення. Методології ройового інтелекту та координації можна покращувати та об'єднувати між собою для спільного вирішення проблем, зберігаючи при цьому достатній рівень масштабованості.

Як вже зазначалося вище, для координації рою дронів можна не обмежуватися однією моделлю координації, а використовувати переваги декількох чи усіх одразу [14]. Так можна об'єднати самоорганізовану та децентралізовані моделі, щоб мати змогу розбивати рій дронів на групи, що зможуть самостійно для себе та окремо від кожної групи виконувати поставлені задачі з пошуку, аналізу, підтримки тощо. Така об'єднана модель дозволить значно розширити зону виконання операції, адже групи дронів будуть лише об'єднані лише спільною задачею, а зони пошуку будуть розбиватись між собою автоматично. Таку модель ще називають зграйною.

Зграйна поведінка – це ефект індивідуальних правил, заснованих на вирівнюванні, поділі та згуртованості. Згідно з правилами вирівнювання, дрони мають тенденцію рухатися в тому ж напрямку, що й найближчі дрони з групи (зграї). Завдяки правилам поділу, дрон зберігає мінімальну дистанцію, що забезпечує йому гнучкість під час руху та дає більшу область покриття для дослідження. Згідно з правилами згуртованості, дрон має тенденцію рухатися до своєї зграї, а головний дрон зі зграї має тенденцію рухатись до інших зграй, не віддаляючись від рою.

Таким чином, застосовуючи зграйний метод розподілу ролей кожен дрон стає залежним від своєї групи та рою, що покращує результати пошуку, дає більшу область покриття, а також економить час роботи в небі, оскільки скоординований пошук спеціально організується для скорочення загального часу і, відповідно, зменшенні витрат на виконання операції. Для оператора інформаційної системи з координації над роєм та скоординовані зграйним методом, дрони будуть розглядатися як єдиний масив датчиків [15], налаштованих на вимірювання необхідних параметрів навколишнього середовища в зоні виконання операції.

3.4.2 Централізована модель керування

Централізована модель управління роєм дронів базується на наявності одного центрального вузла, який координує всі дії дронів. Центральний контролер отримує інформацію від кожного дрона, аналізує її, приймає рішення та розподіляє команди між виконавцями. Дрони у цій моделі виконують лише ті завдання, які їм надсилає контролер, не приймаючи автономних рішень.

Ця модель працює наступним чином: дрони передають центральному контролеру дані про своє місцезнаходження, стан акумуляторів, перешкоди та іншу важливу інформацію. Контролер обробляє ці дані, створюючи глобальний план дій. Потім він надсилає інструкції кожному дрону, які ті

виконують. Така схема є популярною для завдань, що вимагають високого рівня координації, наприклад, під час моніторингу, інспекції або доставки вантажів. Приклад роботи даної схеми зображено на рисунку 3.7.

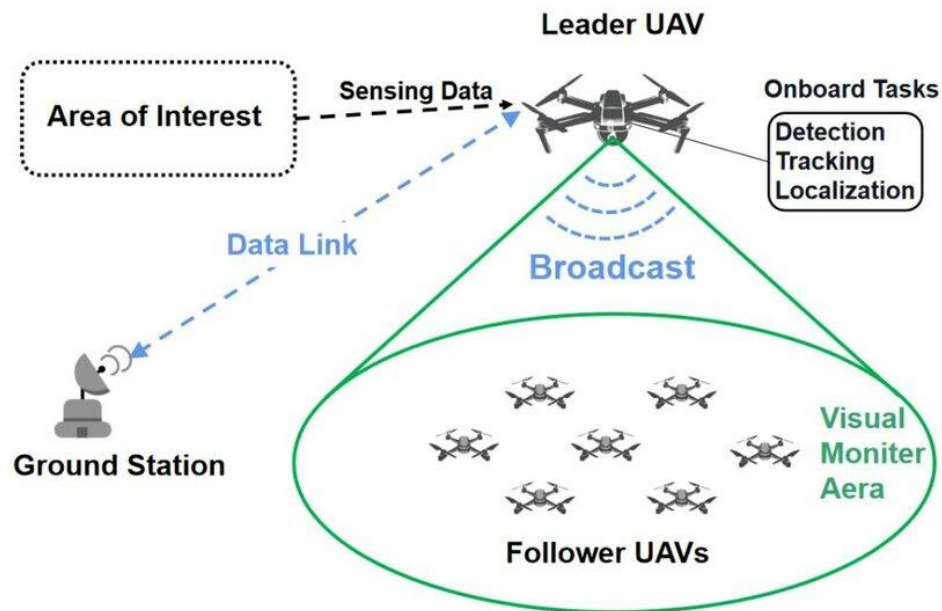


Рисунок 3.7 – Загальна схема взаємодії в рої з централізованою моделлю керування, якщо центральним контролером виступає дрон

Серед переваг централізованої моделі можна виділити те, що всі рішення приймаються в одному вузлі, що забезпечує повний контроль над ройовою системою. Це дозволяє ефективно координувати дії дронів, уникати конфліктів і дублювання завдань. Завдяки централізованому зберіганню даних спрощується їх аналіз, а також можливість оновлювати алгоритми в центральному вузлі без втручання у кожен дрон окремо.

Водночас існують і певні недоліки. Центральний контролер є критичною точкою системи – якщо він виходить з ладу, весь рій перестає працювати. Крім того, при збільшенні кількості дронів значно зростає навантаження на контролер, що може уповільнювати роботу системи. Також можливі затримки у передачі команд через канали зв'язку, що особливо критично у динамічних сценаріях.

Впровадження штучного інтелекту в централізовану модель управління дає значні переваги: алгоритми ШІ дозволяють ефективно обробляти великі обсяги даних у реальному часі, наприклад, аналізувати зображення, виявляти об'єкти чи перешкоди. ШІ також сприяє оптимізації маршрутів дронів, що зменшує час виконання завдань і споживання енергії. Завдяки використанню методів прогнозування, система може адаптуватися до змінних умов, наприклад, передбачати погодні зміни або визначати, які дрони потребують підзарядки.

Крім того, ШІ може централізовано вирішувати складні обчислювальні завдання, що зменшує навантаження на кожен окремий дрон. Це особливо важливо для завдань, які вимагають високого рівня автоматизації, таких як рятувальні операції або моніторинг критично важливих об'єктів. Наприклад, під час інспекції мосту центральний контролер із ШІ може аналізувати зображення, автоматично ідентифікувати пошкодження конструкцій та направляти дрони до проблемних ділянок.

Попри всі переваги, використання цієї моделі потребує ретельного проектування ІС рою, забезпечення надійного зв'язку між дронами та контролером, а також запобігання можливим збоєм, пов'язаним із центральним вузлом.

3.4.3 Децентралізована модель керування

Децентралізована модель керування роєм дронів ґрунтується на відсутності єдиного центрального контролера. У цій моделі кожен дрон діє як автономний агент, здатний самостійно приймати рішення на основі локальної інформації та взаємодії з іншими дронами в рої. Усі дрони взаємодіють між собою, обмінюючись інформацією про своє місцезнаходження, стан, наявність перешкод та інші параметри. При цьому керування роєм досягається завдяки колективному прийняттю рішень, яке забезпечує високу гнучкість та стійкість системи.

У децентралізованій моделі кожен дрон використовує алгоритми, що дозволяють йому враховувати найближчі об'єкти, інші дрони та поточну ситуацію. Наприклад, рій дронів може координувати свої дії для обстеження території, розподіляючи зони обстеження між собою без централізованого втручання. Кожен дрон приймає рішення локально, базуючись на поточній інформації, отриманій від сусідів, і виконує свої завдання незалежно від інших. Такий підхід забезпечує високу масштабованість системи, адже зростання кількості дронів не призводить до перевантаження жодного окремого вузла.

Отримання інформації від інших дронів у децентралізованій моделі керування може здійснюватися через посередників, у випадку, якщо усі дрони-адресати не знаходяться в межах дії передатчика дрона-відправника. Алгоритм передачі повідомлення через посередників зображено на рисунку 3.8.

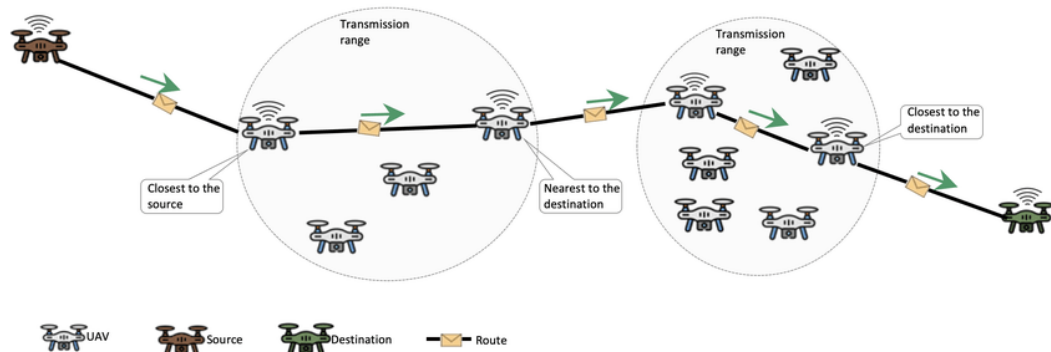


Рисунок 3.8 – Ретрансляція повідомлення через декілька дронів у випадку недостатньої дальності передачі повідомлення

Основною перевагою децентралізованої моделі є її стійкість до збоїв. Втрата одного або кількох дронів не впливає на загальну функціональність рою, оскільки відсутній центральний контролер, від якого залежить робота всієї системи. Децентралізоване управління також дозволяє адаптуватися до непередбачуваних змін у навколишньому середовищі, оскільки кожен дрон

може швидко реагувати на локальні умови. Крім того, така модель забезпечує мінімальні затримки у прийнятті рішень, адже рішення приймаються безпосередньо на рівні окремого дрона.

Застосування штучного інтелекту в децентралізованій моделі відкриває нові можливості для вдосконалення системи. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє кожному дрону вивчати оточення, прогнозувати дії сусідніх дронів і приймати оптимальні рішення.

Ще однією перевагою ШІ в цій моделі є здатність забезпечувати автономність рою навіть за відсутності постійного зв'язку. Кожен дрон може використовувати моделі ШІ для аналізу локальної ситуації, визначення пріоритетів і коригування своїх дій. Наприклад, під час рятувальних операцій рій дронів із ШІ може самостійно розподіляти завдання, знаходити потерпілих і визначати оптимальні шляхи для виконання місії.

Завдяки використанню штучного інтелекту децентралізована модель керування отримує значну перевагу у гнучкості, автономності та здатності до самоорганізації. Попри те, що така модель потребує складніших алгоритмів і високої обчислювальної потужності на рівні кожного дрона, вона забезпечує високий рівень надійності та ефективності в умовах динамічних і непередбачуваних сценаріїв.

3.4.4 Ієрархічне управління в групах

Ієрархічна модель керування роєм дронів базується на побудові багаторівневої структури управління, у якій окремі дрони чи групи дронів виконують ролі з різним рівнем відповідальності. У такій системі визначаються лідери, які координують роботу підлеглих дронів, і кілька рівнів командного управління, що дозволяють розподіляти завдання по всій ієрархічній структурі. Ключовою особливістю цієї моделі є те, що кожен рівень має свою конкретну функцію, яка сприяє досягненню загальної мети.

Загальний вигляд даної моделі зображено на рисунках 3.9 та 3.10. На рисунку 3.9 видно дрони-лідери, що знаходяться зверху (слої 2), які керують групами дронів знизу. В кожній з окремих груп існує власний дрон-лідер, який підпорядковується наказам дронів-лідерів вищої категорії та сам віддає команди всім дронам власної групи. Рисунок 3.10 відображає роботу дронів лідерів у окремих групах без наявності вищого шару лідерів.

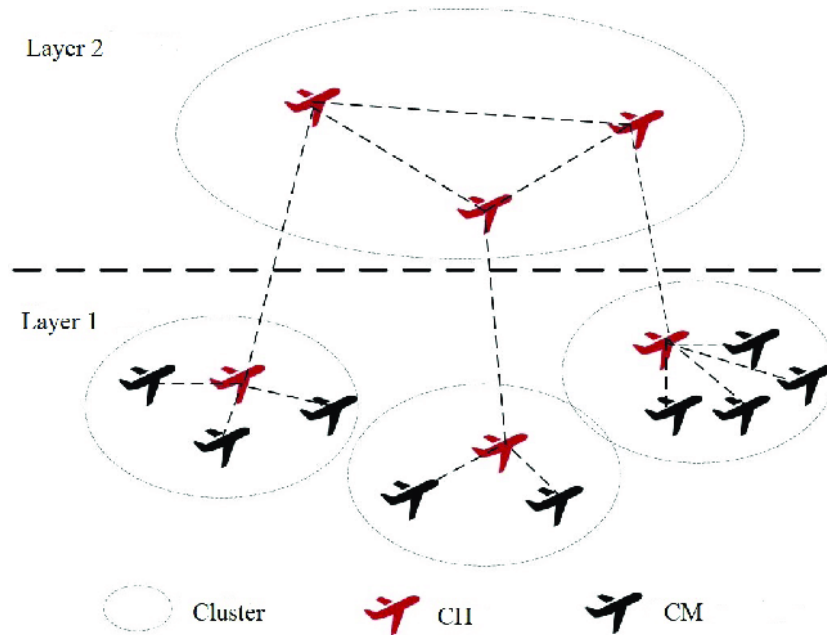


Рисунок 3.9 – Ієрархічне управління над роєм в групах з різними рівнями відповідальності

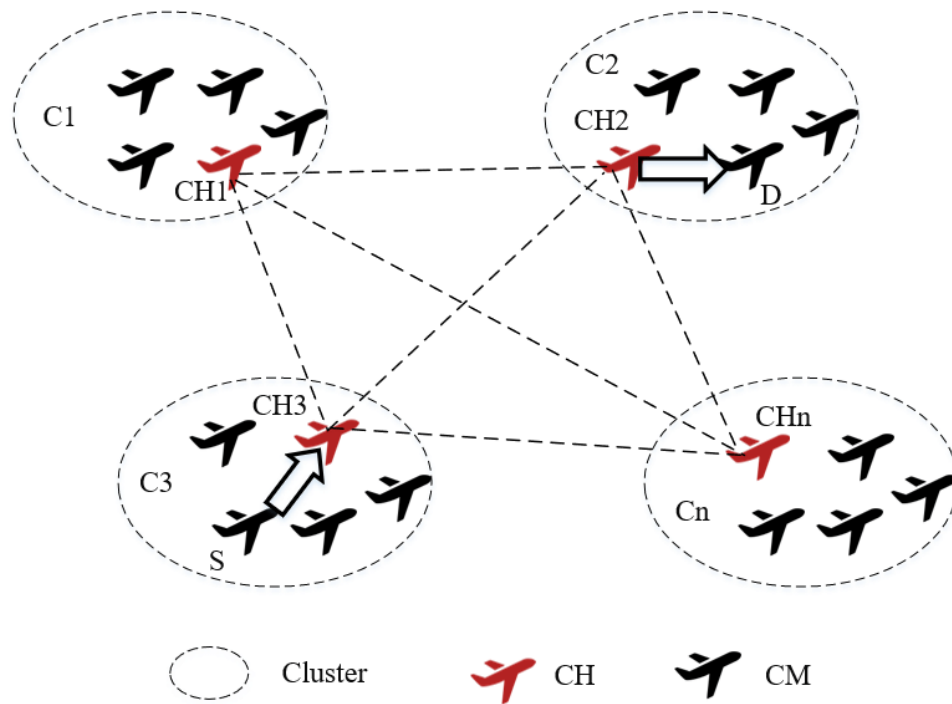


Рисунок 3.10 – Комунікація між групами дронів при використанні децентралізованої моделі керування

У цій моделі дрони вищого рівня ієрархії отримують глобальні завдання, обробляють їх та передають команди на нижчі рівні. Дрон-лідер може визначити загальні цілі, такі як обстеження певної території, після чого він делегує конкретні підзадачі дронам-підлеглим. Дрони нижчого рівня виконують завдання та передають дані або результати роботи як далі на нижні рівні, так і назад дронам-лідерам. Така система забезпечує чітку координацію та розподіл обов'язків, зберігаючи при цьому можливість локальної автономності на кожному рівні.

Ієрархічна модель поєднує елементи централізованого та децентралізованого управління. Вона дозволяє ефективно керувати великими роями дронів, уникаючи перевантаження одного центрального вузла, як у централізованій моделі, але при цьому зберігає можливість глобального управління. Така система є особливо корисною в складних сценаріях, де потрібен розподіл завдань між різними групами дронів.

Однією з ключових переваг ієрархічної моделі є її стійкість до збоїв. У разі виходу з ладу дронів одного рівня, система може перенаправити управління на інші рівні, що забезпечує безперервність виконання завдань. Крім того, така структура легко масштабована, оскільки нові дрони можуть бути інтегровані в існуючу ієрархію без потреби суттєвих змін у загальній системі управління.

ШІ в даній моделі керування може бути використаний для оптимізації розподілу завдань між рівнями ієрархії, аналізу даних, що надходять від підлеглих дронів, і автоматичного прийняття рішень на різних рівнях управління. Наприклад, дрони-лідери можуть використовувати алгоритми ШІ для аналізу глобальної ситуації, прогнозування потенційних ризиків і адаптації загальної стратегії до змінних умов. Дрони нижчого рівня, оснащені ШІ, можуть виконувати локальні завдання автономно, такі як розпізнавання об'єктів, уникнення перешкод і навігація в складних умовах. Таким чином кожен з дронів у рої буде мати власний вузько-спеціалізований ШІ на борту, що дозволить йому швидше та ефективніше виконувати поставлену перед ним задачу.

Використання ШІ також дозволяє забезпечити адаптивність системи. У разі непередбачуваних змін у середовищі, наприклад, появи нових перешкод або зміни погодних умов, дрони зможуть самостійно змінювати свої дії, дотримуючись загальної стратегії, розробленої вищими рівнями ієрархії. Алгоритми машинного навчання дозволяють кожному рівню системи вдосконалювати свою роботу на основі попереднього досвіду, що підвищує загальну ефективність рою.

У підсумку можна сказати, що ієрархічна модель із застосуванням ШІ є особливо ефективною у складних та динамічних умовах, де необхідно поєднувати глобальне управління з локальною автономністю. Вона дозволяє забезпечити високий рівень координації, надійності та адаптивності, що робить її придатною для широкого спектра завдань у різних галузях.

3.4.5 Ройова модель керування

Ройова модель керування дронами імітує поведінку природних роїв, таких як зграї птахів, косяки риб чи колонії мурах. У цій моделі всі дрони є рівноправними агентами без центрального контролера чи чітко визначеної ієрархії. Управління роєм досягається за рахунок локальної взаємодії між дронами, де кожен агент приймає рішення на основі інформації, отриманої від сусідніх дронів, і аналізу свого оточення. Такий підхід створює систему, яка здатна до самоорганізації та координації дій навіть у динамічному середовищі.

У ройовій моделі кожен дрон дотримується простих правил поведінки, таких як уникнення зіткнень, вирівнювання траєкторій з сусідами та підтримка певної відстані між іншими агентами. Завдяки цим правилам рій може діяти як єдине ціле, адаптуючись до змінних умов середовища без потреби централізованого втручання. Наприклад, якщо один з дронів виявляє перешкоду, інформація про неї поширюється через локальну взаємодію, і весь рій змінює траєкторію, щоб обійти цю перешкоду. Такий підхід забезпечує стійкість системи до втрати окремих дронів, адже їхня відсутність не впливає на загальну функціональність рою.

Ройова модель є високоефективною у завданнях, де необхідно покривати велику територію, проводити пошуково-рятувальні операції або виконувати моніторинг складних об'єктів. Її головною перевагою є те, що вона не потребує централізованого управління, що знижує ризик збоїв через вихід з ладу центрального вузла. Крім того, така модель добре масштабована, оскільки додавання нових дронів у рій не потребує змін в алгоритмі роботи.

Використання ШІ у ройовій моделі покращує її адаптивність. Алгоритми ройового інтелекту, натхненні природними системами, дозволяють дронам ефективно координувати свої дії, знаходити оптимальні шляхи для досягнення цілей і виконувати завдання з мінімальними витратами енергії. ШІ може забезпечувати обробку даних у реальному часі, наприклад, для виявлення об'єктів чи аналізу змін у середовищі.

Завдяки машинному навчанню дрони можуть покращувати свої дії, враховуючи попередній досвід. Наприклад, алгоритми ШІ дозволяють рою автоматично визначати, які області території вже були обстежені, а які потребують додаткової уваги, мінімізуючи дублювання зусиль. Також штучний інтелект дозволяє інтегрувати складні завдання, такі як розпізнавання сигналів потерпілих чи прогнозування потенційних загроз, у рамках локальної взаємодії дронів.

Ключовою перевагою ШІ в цій моделі можна назвати можливість запровадження алгоритмів для масштабного розподіленого обчислення, коли кожен дрон виконує свою частину завдання, а результати об'єднуються для досягнення глобальної мети. Це дозволяє рою вирішувати складні проблеми без потреби у великих обчислювальних потужностях на рівні одного вузла. Наприклад, у пошукових операціях рій дронів може автономно розподіляти зони пошуку, аналізувати отримані дані і спільно визначати місцезнаходження об'єкта. В такій моделі з використанням ШІ дрони будуть об'єднані у загальну обчислювальну систему, яка дозволяє одночасно виконувати основну задачу та аналізувати будь-які додаткові дані, як це зображено на рисунку 3.11.

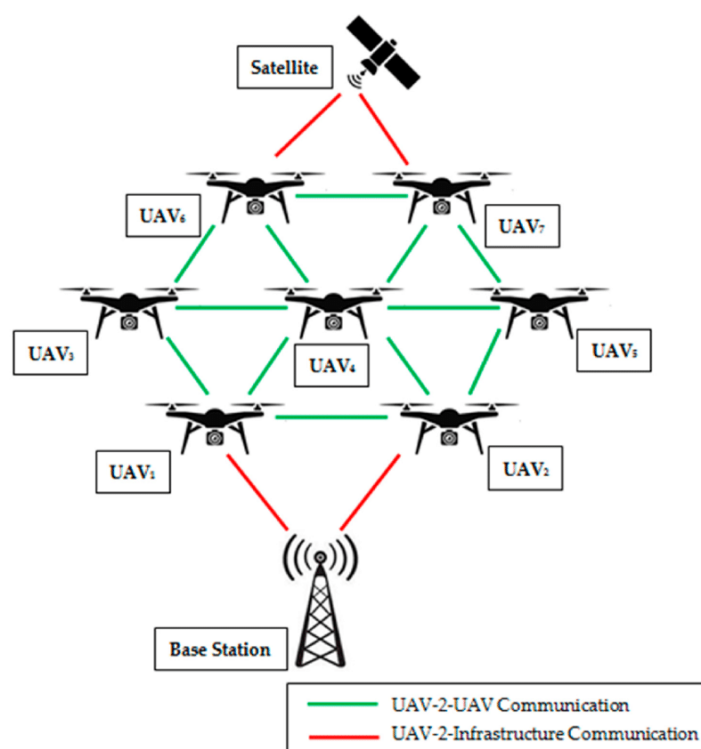


Рисунок 3.11 – Мережа взаємодії між дронами в ройовій моделі керування

Ройова модель ідеально підходить для застосування у складних та динамічних середовищах, де потрібна колективна взаємодія, автономність і здатність до швидкого реагування на зміни.

3.4.6 Гібридна модель керування

Гібридна модель керування роєм дронів поєднує елементи централізованої, децентралізованої, ієрархічної та, за потреби, ройової моделей. У цій системі різні частини рою можуть використовувати різні підходи до керування залежно від завдання, умов середовища або рівня складності операції. Це створює високо функціональну систему, здатну адаптуватися до динамічних ситуацій і працювати з максимальною ефективністю.

У гібридній моделі дрони можуть бути організовані у кілька підгруп, кожна з яких керується певним підходом. Наприклад, одна частина рою може працювати під централізованим керуванням, виконуючи завдання за конкретними вказівками від центрального контролера, тоді як інша частина може діяти за принципами децентралізованого чи ройового управління. Такий підхід дозволяє інтегрувати глобальний контроль із локальною автономністю. У рамках гібридної моделі лідери груп можуть координувати дії підпорядкованих дронів, при цьому кожен дрон може приймати самостійні рішення в межах своєї групи.

Загально кажучи, в даній моделі рій розподіляється на підгрупи-рої, де кожна окрема група виконує власні задачі, може керуватися за індивідуальною моделлю, але виконувати ту ж основну задачу, що й всі інші групи в рої.

Гібридна модель забезпечує ефективний розподіл завдань між дронами, зберігаючи при цьому гнучкість і здатність до адаптації. Наприклад, під час

обстеження великої території центральний контролер може розподіляти зони для різних груп дронів, але кожна група діє автономно, спираючись на локальну інформацію. Це дозволяє досягти оптимального балансу між централізованим контролем і автономністю, а також знижує ризик втрати керування в разі відмови одного з компонентів системи. Загальна схема з розподілом на групи в межах зони дії задачі зображена на рисунку 3.12.

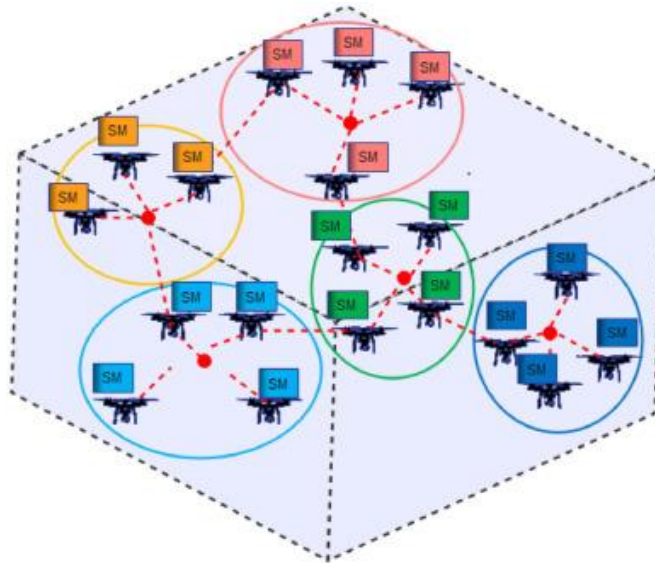


Рисунок 3.12 – Схема розподілу рою дронів та п'ять окремих груп з різною кількістю БПЛА та різними задачами

Застосування ШІ в гібридній моделі значно підвищує її ефективність. ШІ дозволяє автоматизувати процеси розподілу завдань між дронами, аналізу даних та прийняття рішень як на глобальному, так і на локальному рівнях. Наприклад, алгоритми машинного навчання можуть використовуватися для прогнозування можливих загроз, адаптації маршрутів руху дронів до змінних умов і оптимізації взаємодії між групами. Центральний контролер із використанням ШІ може аналізувати дані з усього рою, коригувати стратегії роботи і перерозподіляти ресурси у разі змін у середовищі.

ШІ також сприяє покращенню локальної автономності кожного дрона. Використовуючи алгоритми глибокого навчання, дрони можуть

ідентифікувати об'єкти, уникати перешкод, а також виконувати складні завдання, такі як створення карт або розпізнавання сигналів у реальному часі. Алгоритми ройового інтелекту можуть бути інтегровані для забезпечення високого рівня координації між дронами в межах груп, що дозволяє їм ефективно працювати разом навіть у складних умовах.

Ще однією перевагою використання ШІ є здатність забезпечувати динамічну зміну стратегії управління залежно від поточної ситуації. Наприклад, у випадку, якщо центральний контролер виходить з ладу, система може автоматично перейти на децентралізований або ройовий підхід до управління, зберігаючи загальну функціональність. Це робить гібридну модель стійкою до збоїв і забезпечує безперервність виконання місії – тобто зменшує вплив основного проблемного фактору моделі.

Гібридна модель з інтеграцією штучного інтелекту пропонує найкраще з різних підходів до управління роєм дронів. Вона забезпечує надзвичайно високу гнучкість та ефективність, роблячи її придатною для виконання широкого спектра завдань у складних і динамічних умовах. Проте дана модель може поступатися в надійності іншим в складних умовах проведення роботи рою.

3.4.7 Рольове управління

Рольова модель керування роєм дронів базується на призначенні окремих ролей кожному дрону в залежності від його функціональних можливостей, положення в рої чи завдань, що стоять перед системою. У цій моделі дрони розподіляють між собою ролі, які можуть бути постійними або змінюватися залежно від умов середовища чи ходу виконання завдання. Наприклад, деякі дрони можуть виконувати роль лідерів, інші – збирачів даних, зв'язкових чи виконавців конкретних операцій. Ця структура дозволяє оптимізувати функціонування рою за рахунок спеціалізації кожного агента та узгодження їх дій.

В основному, дрони все ж таки приймають притаманні для себе задачі, які відповідають їхнім технічним особливостям та класифікації їхньої моделі. Для кращого розуміння на рисунку 3.13 було наведено класифікації БПЛА на основі їх конструктивних особливостей.

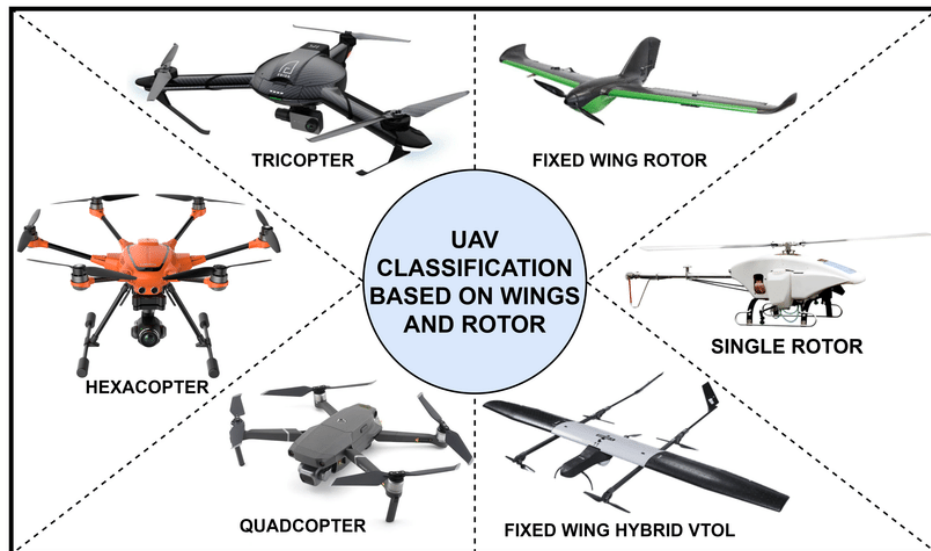


Рисунок 3.13 – Міжнародна класифікація БПЛА на основі їх конструктивних особливостей

У межах ролі моделі керування кожен дрон діє відповідно до своєї ролі, але при цьому враховує інформацію, отриману від інших дронів, що забезпечує високу взаємодію між агентами. Так дрони, які виконують роль лідерів, можуть приймати рішення на основі глобальної інформації, тоді як виконавці реалізують завдання локально, спираючись на отримані інструкції. Іноді ролі можуть бути гнучкими: якщо певний дрон виходить з ладу, його роль може бути автоматично передана іншому дрону того ж або схожого класу. Це робить систему досить стійкою до втрат окремих елементів і дозволяє зберігати її працездатність навіть у складних умовах.

Перевагою ролі моделі є її здатність забезпечувати високу ефективність виконання завдань завдяки спеціалізації. Дрони можуть виконувати свої ролі з максимальною продуктивністю, оскільки кожен із них

сфокусований на певному завданні. Це особливо корисно в складних місіях, які вимагають одночасного виконання кількох різнопланових дій, наприклад, моніторингу території, збору даних, передачі сигналів і взаємодії з іншими ролями.

Штучний інтелект у цій моделі відіграє ключову роль, забезпечуючи автоматизацію розподілу ролей і адаптацію системи до змін у реальному часі. Алгоритми машинного навчання дозволяють аналізувати характеристики кожного дрона, його стан і функціональні можливості, щоб визначити, яка роль найбільше підходить в конкретний момент. Наприклад, ШІ може враховувати рівень заряду батареї, технічні особливості або положення дрона, щоб ефективно перерозподілити ролі в рої.

Застосування ШІ також забезпечує динамічне оновлення ролей у разі змінних умов. Якщо під час виконання місії змінюються завдання або з'являються нові перешкоди, система, на основі алгоритмів ШІ, може перерозподіляти ролі, оптимізуючи дії рою. Наприклад, дрон, який раніше виконував роль збирача даних, може бути переведений у роль зв'язкового, якщо це необхідно для підтримки комунікації між групами.

Крім того, алгоритми штучного інтелекту сприяють підвищенню автономності дронів, дозволяючи їм приймати рішення локально в межах своїх ролей. Наприклад, дрони можуть самостійно аналізувати оточення, визначати пріоритетність завдань і координувати свої дії з іншими дронами. Це забезпечує гнучкість і ефективність роботи системи, навіть якщо зовнішній контроль відсутній.

Рольова модель керування, інтегрована зі штучним інтелектом, дозволяє створювати стійкі, масштабовані та високоефективні рої, які здатні успішно виконувати складні та багатозадачні місії в динамічних умовах.

4 МЕТОДИ ТЕСТУВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЇ РОЮ ДРОНІВ

4.1 Методи симуляції застосування ройового інтелекту

Методи симуляції застосування ройового інтелекту дозволяють моделювати поведінку рою автономних агентів, аналізувати їхню взаємодію, тестувати алгоритми керування і адаптації до змінних умов середовища.

Ройовий інтелект базується на принципах самоорганізації, децентралізованого управління та локальної взаємодії, тому симуляція такого типу систем потребує спеціалізованих підходів та інструментів. У межах цих методів враховуються фізичні, математичні та обчислювальні моделі, що дозволяють максимально точно відтворювати реальність.

Один із поширених методів симуляції – використання агентно-орієнтованого моделювання. У цьому підході кожен дрон моделюється як окремий агент із певними характеристиками, здатністю приймати рішення і взаємодіяти з іншими агентами та навколишнім середовищем. Така симуляція дозволяє відстежувати індивідуальну поведінку кожного агента, а також вивчати, як їхня локальна взаємодія впливає на глобальну поведінку рою. Агентно-орієнтовані моделі використовуються для тестування алгоритмів ройового інтелекту, таких як оптимізація маршруту, адаптація до динамічних умов чи уникнення зіткнень.

Ще одним важливим методом є симуляція на основі фізичних моделей, яка враховує реалістичні обмеження, такі як аеродинамічні характеристики, енергоспоживання чи вплив зовнішніх факторів, таких як вітер чи перешкоди. Фізично обґрунтовані симуляції дозволяють оцінювати, наскільки ефективно ройовий інтелект працюватиме у реальних умовах. Вони часто використовуються для тестування апаратного забезпечення дронів або перевірки ефективності алгоритмів у складних сценаріях.

Математичні методи моделювання, зокрема використання диференціальних рівнянь або стохастичних моделей, дозволяють описувати динаміку поведінки рою як єдиного цілого. Ці методи забезпечують високий рівень абстракції та можуть бути інтегровані з іншими підходами для більш точного моделювання.

Симуляція на основі обчислювальних експериментів також є важливим методом. Вона використовує спеціалізовані програмні платформи, такі як Gazebo, V-REP, AirSim, або Webots, які забезпечують віртуальне середовище для тестування ройового інтелекту. Ці платформи дозволяють інтегрувати фізичні, математичні та обчислювальні моделі, створюючи високо реалістичні симуляції. З їхньою допомогою можна відтворювати сценарії взаємодії рою у складних умовах, таких як густі міські райони, лісові масиви або підводне середовище.

Штучний інтелект відіграє важливу роль у процесі симуляції ройового інтелекту. Наприклад, методи машинного навчання використовуються для створення адаптивних алгоритмів, що дозволяють агентам навчатися у процесі симуляції. Це може включати навчання на основі підкріплення, коли агенти оптимізують свою поведінку, отримуючи винагороди за досягнення цілей. Крім того, глибоке навчання може використовуватися для моделювання складної взаємодії між агентами та середовищем.

Методи симуляції також включають багаторівневий аналіз, який дозволяє одночасно моделювати локальну взаємодію агентів і глобальні характеристики рою. Наприклад, симуляції можуть враховувати як дії окремих дронів, так і результати їхньої колективної діяльності, такі як покриття певної території чи формування заданих структур.

Завдяки різним методам моделювання, розробники ройового інтелекту та інтелекту на основі ШІ можуть випробовувати різні сценарії, аналізувати ефективність алгоритмів і покращувати їх перед впровадженням у фізичні системи.

4.2 Методи тестування роїв дронів в реальних умовах

Методи тестування роїв дронів у реальних умовах спрямовані на перевірку працездатності алгоритмів керування, взаємодії між дронами, їхньої адаптивності до середовища та здатності виконувати завдання. Такі тести є важливим етапом у розробці та вдосконаленні систем ройового інтелекту, оскільки вони дозволяють оцінити реальну ефективність роботи рою, враховуючи всі можливі фізичні, екологічні та технічні обмеження.

Одним із ключових методів є поетапне тестування у контрольованому середовищі. Спочатку рій випробовують у спрощених умовах, таких як великі закриті приміщення або лабораторії, де можна повністю контролювати зовнішні фактори. Це дозволяє перевірити базову функціональність дронів, включаючи зліт, посадку, навігацію та комунікацію між агентами. У таких умовах зручно тестувати алгоритми уникнення зіткнень, формування формацій, слідування за лідером та інші базові функції.

Після успішного тестування в контрольованому середовищі проводять випробування на відкритій території, але все ще в контрольованих умовах, таких як полігони. На цьому етапі додаються фактори зовнішнього середовища, як вітер, нерівності місцевості чи перешкоди у вигляді дерев, будівель або інших об'єктів. Це дозволяє оцінити, як рій реагує на змінні умови середовища та перевірити стійкість алгоритмів адаптації. У процесі тестування оцінюється точність виконання завдань, стабільність комунікації між дронами та здатність системи до самоорганізації.

Наступним етапом тестування є тестування у реалістичних сценаріях. Це включає виконання конкретних завдань, таких як моніторинг території, пошук об'єктів, доставка вантажів чи спільна робота під час рятувальних операцій. Сценарії моделюють ситуації, з якими рій може стикнутися під час реальної експлуатації, наприклад, пошук людей у зоні стихійного лиха, патрулювання на кордонах або моніторинг екологічного стану територій. Тут перевіряється не лише здатність виконувати завдання, але й ефективність роботи рою за

обмежених ресурсів, таких як енергія, або в умовах втрати одного чи кількох дронів.

Для тестування у реальних умовах використовують методи стрес-тестування, які передбачають створення складних і непередбачуваних ситуацій, таких як відмова комунікацій, несподівана поява перешкод чи змінні погодні умови. Такі випробування дозволяють оцінити стійкість системи до збоїв і здатність рою зберігати функціональність у критичних ситуаціях. Наприклад, тестують, як рій відновлює структуру після втрати центрального лідера або як дрони знаходять альтернативні шляхи для виконання завдання.

У процесі тестування використовують системи моніторингу та збору даних, які включають як зовнішнє спостереження (за допомогою камер, сенсорів чи радарів), так і внутрішні лог-файли кожного дрона. Це дозволяє отримувати точну інформацію про поведінку рою, збої у взаємодії чи помилки в алгоритмах. Аналіз цих даних дозволяє розробникам знаходити слабкі місця у системі та вдосконалювати її.

Реальне тестування також включає оцінку взаємодії рою з іншими системами, такими як оператори, наземні станції чи інші автономні пристрої. Так під час тестування у симуляції рятувальної операції перевіряється як саме рій реагує на команди лідера (автоматизованого дрона чи оператора) та як інтегрується з іншими роботами для спільного виконання завдань.

Ще одним не менш важливим аспектом є тестування комунікаційних протоколів, що забезпечують обмін інформацією між дронами. Під час цього тестування оцінюється здатність рою підтримувати стабільний зв'язок у складних умовах, таких як завади сигналу чи велика відстань між агентами.

Таким чином, методи тестування роїв дронів у реальних умовах є багаторівневим процесом, який охоплює всі аспекти роботи системи. Вони дозволяють перевірити працездатність, адаптивність і стійкість ройового інтелекту, забезпечуючи надійність і ефективність дронів у реальних сценаріях використання.

5 МОЖЛИВІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ РОЇВ ДРОНІВ

5.1 Безпекові проблеми застосування роїв дронів

5.1.1 Технічні уразливості

Основна безпекова проблема застосування роїв дронів – це ризик технічних збоїв у роботі рою. Оскільки рій зазвичай працює на основі складних алгоритмів та комунікаційних протоколів, навіть незначний збій у ПЗ або апаратній частині одного дрона може викликати ланцюгову реакцію в усьому рої. Це може призвести до втрати координації, зіткнень між дронами або невиконання завдання.

Дрони також залежать від зовнішніх сигналів, таких як GPS, Wi-Fi або радіозв'язок. Перешкоди чи спотворення цих сигналів можуть порушити навігацію, змусити дрони відхилитися від курсу чи навіть викликати їхнє падіння. Особливо вразливі до цього рої, які працюють у міських умовах із високим рівнем радіоперешкод.

5.1.2 Кібератаки та злом

Дрони, які використовують мережеве з'єднання для обміну даними між собою, є потенційними мішенями для кібератак. Хакери можуть перехопити управління над роїм, вкрасти дані, які збирають дрони, або навіть використати рій для шкідливих цілей. Зокрема, можливий злам комунікаційних протоколів, впровадження шкідливого коду або створення фальшивих сигналів для дезорієнтації рою.

Крім того, загрозу становлять атаки типу DoS, які можуть спричинити перевантаження мережі комунікацій між дронами, змушуючи їх втратити

координацію. Це особливо небезпечно в критично важливих сценаріях, таких як рятувальні операції або військові завдання.

5.1.3 Безпека для людей та майна

Рої дронів становлять фізичну загрозу у разі зіткнень із людьми, будівлями чи іншими об'єктами. У разі збою в управлінні або навігації дрони можуть падати на землю, завдаючи шкоди людям, тваринам чи інфраструктурі. Особливо небезпечними є великі рої, де навіть невелика кількість дронів, що вийшли з-під контролю, може спричинити масштабні наслідки.

Також існує ризик неправильної ідентифікації цілей, коли рій, оснащений сенсорами або камерами, помилково сприймає об'єкти як завдання. Це може призвести до небажаних дій, наприклад, обстрілу цивільних чи доставки вантажу у хибне місце. Особливої критичності дана проблема набуває у випадку використання військових роїв дронів, так як ці дрони можуть містити вибухові речовини, а кількість дронів, розгорнутих одночасно в рої, може нараховувати сотні. Такі дрони запускаються зі спеціальних мобільних платформ та втрата контролю над таким роєм є катастрофічною загрозою.

Зображення мобільної платформи для розгортання рою військових дронів наведено на рисунку 5.1.



Рисунок 5.1 – Військова техніка для розгортання рою дронів з бойовою частиною

5.2 Правові питання щодо застосування роїв дронів

5.2.1 Загроза приватності

Рої дронів, які обладнані камерами, мікрофонами та іншими сенсорами, можуть порушувати приватність людей. Використання дронів для моніторингу чи збору даних без відповідного дозволу може спричинити етичні питання і навіть конфлікти із законодавством. Особливо це стосується міських територій, де дрони можуть випадково або цілеспрямовано фіксувати приватну інформацію.

5.2.2. Невизначеність у регуляторній сфері

Законодавство щодо використання роїв дронів у багатьох країнах ще не є достатньо розвиненим. Відсутність чітких правил може призводити до неправомірного використання роїв, наприклад, у військових цілях або для

стеження. Це створює ризики як для громадян, так і для організацій, які хочуть законно використовувати рої у своїй діяльності.

Керівництво держав у багатьох випадках буде протидіяти навіть одиничним дронам у випадку відсутності дозволу на польоти. Особливо це стосується військових об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури. Для протидії дронам використовують засоби РЕБ, такі як на рисунку 5.1.



Рисунок 5.2 – Застосування мобільного засобу РЕБ для подавлення GPS сигналу дронів

5.2.3 Етичні проблеми та потенційне військове використання

Застосування роїв дронів у військових цілях викликає серйозні етичні питання. Використання автономних систем для нанесення ударів може призвести до непередбачуваних наслідків, наприклад, втрат серед цивільного населення. Крім того, автономія рою може ускладнити контроль над їхніми діями, особливо у складних і динамічних умовах.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі було проведено дослідження інтеграції штучного інтелекту в алгоритми керування роєм дронів. Основна увага була зосереджена на аналізі архітектурних рішень, алгоритмів координації, технічних аспектів та потенційних проблем реалізації системи.

Використання технологій організації роїв дронів з використанням штучного інтелекту та розробка спеціалізованих комп'ютерних засобів для цього є провідною технологією на сьогоднішній день. Такі системи виявляють значний потенціал у різних сферах діяльності, починаючи від сільського господарства та закінчуючи надзвичайними ситуаціями та науковими дослідженнями. Використання штучного інтелекту дозволяє дронам працювати автономно та скоординовано, зменшуючи залежність від людського керівництва та підвищуючи ефективність виконання завдань.

У ході роботи було розглянуто сфери застосування роїв дронів та перспективи їх розвитку. Було проаналізовано їхній потенціал у таких галузях, як сільське господарство, рятувальні операції, моніторинг інфраструктури та військові задачі.

Наступним кроком роботи було вивчено архітектуру та алгоритми керування роєм дронів із використанням штучного інтелекту. Зокрема, розглянуто централізовані, децентралізовані та автоматизовані підходи до керування, алгоритми машинного навчання, координації та планування траєкторій.

Також було досліджено технічні складові організації рою дронів, зокрема використання сенсорів, таких як GPS, LIDAR та камери, які забезпечують збір і обробку даних для ефективного функціонування системи.

Були проаналізовані методи тестування та симуляції роботи рою дронів, які дозволяють перевірити ефективність алгоритмів і систем в умовах, максимально наближених до реальних.

Окрім цього, у роботі було висвітлено можливі проблеми використання роїв дронів, зокрема енергозатрати, загрози кібератак, забезпечення надійного зв'язку та складності масштабування системи. В контексті організації рою дронів з використанням ШІ важливо враховувати питання безпеки, конфіденційності та етики використання таких технологій, оскільки вони можуть стати об'єктом кібератак або причиною порушення законодавства розробниками та операторами цих систем. Інтеграція спеціалізованих комп'ютерних засобів вимагає ретельного дослідження ризиків і впровадження відповідних заходів безпеки, аналіз яких було проведено в ході даної роботи

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Cotton Farming with DJI Agriculture Drone Solutions [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/](http://www.dji.com) URL: <https://ag.dji.com/case-studies/cotton-dji-agriculture-solution>
2. Parrot Drone SDK. <https://developer.parrot.com/docs/index.html>
3. Intel Drone Light Shows [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/](http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/brochures/drone-light-show-downloadable-marketing-collateral.pdf) URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/brochures/drone-light-show-downloadable-marketing-collateral.pdf>
4. Prabhu TL. 100 Best generative AI tools. 2022. – 323 с.
5. Saurabh Mittal, Saikou Diallo, Andreas Tolk. Emergent Behavior in Complex Systems Engineering. 2018. – 416 с.
6. Control of a swarm of untethered micro-robots [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/](http://www.msrl.ethz.ch/research/robotics-systems/untethered_micro_and_nanorobots/control_of_a_swarm.html) URL: https://msrl.ethz.ch/research/robotics-systems/untethered_micro_and_nanorobots/control_of_a_swarm.html
7. VII Міжнародна студентська наукова конференція «Наука сьогодні: від досліджень до стратегічних рішень» [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/](http://www.archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/issue/view/inter-01.11.2024) URL: <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/issue/view/inter-01.11.2024>
8. Heiko Hamann. Swarm Robotics: A Formal Approach. 2018. – 224 с.
9. Yuh-Shyan Chen, Chun-Chieh Wang. Artificial Intelligence for Autonomous Networks (Chapman & Hall/CRC Artificial Intelligence and Robotics Series). 2020. – 392 с.
10. Nikolaus Correll та ін. Introduction to Autonomous Robots. 2022. – 288 с.
11. Zhongkui Li Zhongkui Li. Cooperative Control of Multi-Agent Systems: A Consensus Region Approach (Automation and Control Engineering). 2014. – 262 с.

12. Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій 2024. IV міжнародна науково-практична конференція [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://bukuniver.edu.ua/wp-content/themes/bukuniver/docs/tezy_kmpz_2024.pdf](http://www.bukuniver.edu.ua/wp-content/themes/bukuniver/docs/tezy_kmpz_2024.pdf)

13. E. Natalizio та ін. *Advances in Wireless Communication and Networking for Cooperating Autonomous Systems*. 2018. – 27 с.

14. DongXiu Ou, Fei Hu, Xin-lin Huang. *UAV Swarm Networks: Models, Protocols, and Systems*. 2020. – 316 с.

15. Mario G. C. *Swarm coordination of mini-UAVs for target search using imperfect sensors*. 2018. – 149-162 с.

16. Kunz T. H. *Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks*. 2006. – 474 с.