

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І.І.МЕЧНИКОВА

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра математичного забезпечення комп'ютерних систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Кваліфікаційна робота
на здобуття рівня вищої освіти «бакалавр»
(рівень вищої освіти)

Багатоагентна система управління рухом нодів ройового комплексу
(тема кваліфікаційної роботи українською мовою)

Multi-agent control system for the swarm complex nodes movement
(тема кваліфікаційної роботи англійською мовою)

Виконала: здобувачка ВО денної форми навчання
спеціальності 123 – Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

(назва освітньої програми)

Крижевська Анна Андріївна

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Керівник к.т.н., доц. Пенко В. Г.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали, підпис)

Рецензент к.ф.-м.н., доц. Шпинарева І. М.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рекомендовано до захисту:

Захищено на засіданні ЕК № 5

Протокол засідання кафедри

протокол № від « » 2025 р.

№ від « » 2025 р.

Оцінка / /

(за національною шкалою, шкалою ECTS, бали)

Завідувач кафедри

Голова ЕК

Євгеній МАЛАХОВ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

Світлана АНТОЩУК

(підпис)

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці багатоагентної системи управління рухом нодів ройового комплексу, що є актуальним завданням для ефективної та безпечної експлуатації автономних систем у різних сферах застосування, включаючи логістику, оборонні операції та пошуково-рятувальні місії. Метою роботи є апробація нового модифікованого алгоритму планування маршрутів, який дозволяє кільком дронам досягати своїх цілей, ефективно уникаючи зіткнень між собою та обходячи як статичні, так і динамічні перешкоди, за мінімальний час. У роботі детально аналізується предметна область, принципи функціонування централізованих багатоагентних систем, де дрони виступають як сенсори, що передають дані, а центральний вузол агрегує інформацію та віддає команди. Розроблено модифікований алгоритм Дейкстри з інтегрованою часовою компонентою для прогнозування та уникнення конфліктів, а також забезпечено його адаптивність до мінливого середовища. Імплементована симуляційна система з візуалізацією дозволила провести серію експериментальних досліджень, порівнявши ефективність розробленого підходу з модифікацією алгоритму Дейкстри. Отримані результати підтверджують здатність алгоритму до безконфліктної навігації та оптимізації маршрутів, що має значне практичне значення для підвищення безпеки та ефективності функціонування роїв БПЛА.

Ключові слова: багатоагентна система, ройовий комплекс, дрон, планування маршрутів, алгоритм Дейкстри, уникнення конфліктів, централізована система, симуляція, динамічні перешкоди, автоматизована комунікація.

ABSTRACT

The qualification paper is dedicated to the development of a multi-agent system for controlling the movement of nodes within a drone swarm, which is a relevant task for the efficient and safe operation of autonomous systems in various applications, including logistics, defense operations, and search-and-rescue missions. The work aims to test a new modified path planning algorithm that allows multiple drones to reach their destinations while effectively avoiding collisions with each other and bypassing both static and dynamic obstacles, all within minimal time. The paper thoroughly analyzes the problem domain and the functioning principles of centralized multi-agent systems, where drones act as sensors transmitting data, and a central node aggregates information and issues commands. A modified Dijkstra's algorithm with an integrated time component for conflict prediction and avoidance has been developed, ensuring its adaptability to changing environments. An implemented simulation system with visualization enabled a series of experimental studies, comparing the effectiveness of the developed approach with Dijkstra's modified algorithm. The obtained results confirm the algorithm's ability for conflict-free navigation and route optimization, which has significant practical importance for enhancing the safety and efficiency of UAV swarm operations.

Keywords: multi-agent system, drone swarm, drone, path planning, Dijkstra's algorithm, conflict avoidance, centralized system, simulation, dynamic obstacles, automated communication.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	6
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	10
1.1 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ БАГАТОАГЕНТНИХ СИСТЕМ ТА РОЙОВИХ КОМПЛЕКСІВ	10
1.2 ЗАСТОСУВАННЯ РОЙОВИХ СИСТЕМ У ПРАКТИЦІ (БПЛА, РОБОТИ, МОДЕЛЮВАННЯ)	12
1.3 КЛАСИФІКАЦІЯ І ПЕРЕЛІК МЕТОДІВ КООРДИНАЦІЇ ГРУПИ ДРОНІВ	18
1.4 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ЦЕНТРАЛІЗОВАНІЙ СИСТЕМІ.....	21
1.5 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ І АЛГОРИТМІВ	23
1.5.1 Класичний алгоритм Дейкстри	23
1.5.2 Модифікація Дейкстри (метод штрафів на ребрах)	24
1.5.3 CBS (Conflict-Based Search).....	24
1.6 СЕРЕДОВИЩЕ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДРОНІВ ТА ПРИНЦИПИ ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ.....	26
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ НОДІВ РОЙОВОГО КОМПЛЕКСУ	28
2.1 МОДЕЛЬ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	28
2.1.1 Модель агента	28
2.1.2 Модель централізованого планувальника	29
2.2 МОДЕЛЬ ПРОСТОРУ ФУНКЦІОНУВАННЯ	30
2.2.1 Моделювання перешкод	30
2.2.2 Дискретизація простору – граф навігації	31
2.2.3 Спеціальні зони.....	31
2.3 ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ	32
2.4 ПОСТАНОВКА ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ.....	34

	5
2.5 ФУНКЦІЯ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ	35
2.6 МЕХАНІЗМ АДАПТАЦІЇ ДО ДИНАМІЧНИХ ЗМІН	36
3 ВИБІР ЗАСОБІВ РОЗРОБКИ	37
3.1. КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ЗАСОБІВ РОЗРОБКИ	37
3.2. МОВА ПРОГРАМУВАННЯ: PYTHON	38
3.3. ВИКОРИСТАНІ БІБЛІОТЕКИ ТА ЇХ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	40
3.4. АПАРАТНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	43
4. РОЗРОБКА МОДИФІКОВАНОГО АЛГОРИТМУ ДЕЙКСТРИ ТА ЙОГО ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ	45
4.1. КЛАСИЧНИЙ АЛГОРИТМ ДЕЙКСТРИ: ОПИС ТА ОБМЕЖЕННЯ.....	45
4.2. МОДИФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ ДЕЙКСТРИ ДЛЯ БАГАТОАГЕНТНОГО ПЛАНУВАННЯ	46
4.3. Опис ключових структур даних	53
4.4. Механізм перепланування (Re-planning) та адаптації.....	55
5 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ	56
5.1 Модуль сценаріїв (SCENARIOS.PY)	56
5.2 Модуль планування маршрутів (PATHFINDING.PY)	57
5.3 Експериментальні дослідження	59
5.4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	62
5.5 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	65
ВИСНОВКИ	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69
ДОДАТОК А	72
ДОДАТОК Б.....	75

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА – Безпілотний літальний апарат

ГЛОНАСС – Глобальна навігаційна супутникова система (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)

Дейкстра – Алгоритм Дейкстри (Dijkstra's Algorithm)

IMU – Інерціальний вимірювальний блок (Inertial Measurement Unit)

Лідар – Лазерний далекомір (Light Detection and Ranging)

МАРФ – Багатоагентний пошук шляху (Multi-Agent Path Finding)

MAS – Multi-Agent System (Багатоагентна система)

БФС – Пошук у ширину (Breadth-First Search)

ДФС – Пошук у глибину (Depth-First Search)

ЦП – Централізований планувальник

CBS – Пошук на основі конфліктів (Conflict-Based Search)

RRT – Дерево, що швидко досліджує простір (Rapidly-exploring Random Tree)

A* – Алгоритм пошуку А-зірка (A-star search algorithm)

МАО* – Багатоагентний А* (Multi-Agent A-star)

ОЗП – Оперативна пам'ять (RAM – Random Access Memory)

SSD – Твердотілий накопичувач (Solid State Drive)

IDE – Інтегроване середовище розробки (Integrated Development Environment)

ВСТУП

У сучасному світі автономні системи, зокрема безпілотні літальні апарати (БПЛА), відомі як дрони, відіграють дедалі важливішу роль у широкому спектрі застосувань. Від оптимізації логістичних ланцюгів та забезпечення оборонних потреб до проведення пошуково-рятувальних операцій у зонах лиха та моніторингу критичної інфраструктури – їхня здатність виконувати складні завдання автономно та ефективно є фундаментальною. Водночас, розширення сфер використання БПЛА призводить до необхідності їхньої координованої роботи в умовах спільного простору, що породжує низку значних науково-технічних викликів.

Ключові проблеми, що виникають при функціонуванні багатоагентних систем, до яких належать ройові комплекси дронів, включають:

- а) забезпечення безпечного та безконфліктного руху між окремими агентами, особливо у щільно завантажених або обмежених просторах;
- б) необхідність ефективного обходу як статичних (наприклад, будівлі, елементи складської інфраструктури), так і динамічних (рухомі об'єкти, раптові обвали, пожежі) перешкод у реальному часі;
- в) зменшення загального часу виконання завдань (наприклад, часу доставки вантажу або реагування на надзвичайну ситуацію) за умови дотримання всіх вимог безпеки та уникнення конфліктів;
- г) розробка надійних механізмів обміну інформацією та видачі команд між агентами та системою управління, що дозволяє мінімізувати участь людини.

Саме ці задачі, що перебувають на перетині робототехніки, штучного інтелекту та комп'ютерних наук, є центральними для даної дипломної роботи.

Актуальність теми обумовлена стрімким розвитком автономних технологій та зростаючим попитом на ефективні та безпечні рішення для управління роями БПЛА у складних, динамічних та непередбачуваних

середовищах. Розробка інтелектуальних алгоритмів, здатних координувати рух кількох агентів, є критично важливою для їхнього практичного впровадження у цивільних та військових цілях.

Метою роботи є створення та експериментальна апробація модифікованого алгоритму планування маршрутів, який дозволяє кільком автономним агентам (нодам ройового комплексу) досягати своїх цілей, ефективно уникаючи конфліктів між собою та обходячи як статичні, так і динамічні перешкоди, за мінімальний час.

Об'єктом дослідження є багатокомпонентні інтелектуальні системи з мобільними агентами, що функціонують у динамічному просторі. Предметом дослідження є алгоритми побудови маршрутів, оптимізації руху та уникнення конфліктів у таких системах.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні завдання:

- а) проаналізувати предметну область, включаючи загальні принципи функціонування багатоагентних систем, способи отримання дронами інформації про середовище та роль централізованої системи комунікації;
- б) дослідити сучасний стан та існуючі алгоритми планування маршрутів для багатоагентних систем, виявивши їхні переваги та недоліки;
- в) детально описати архітектуру централізованої системи управління ройовим комплексом, де дрони виступають як сенсори, що передають дані, а центральний вузол – як аналітичний та командний центр;
- г) обґрунтувати вибір програмних та апаратних засобів, необхідних для імплементації моделі системи;
- д) розробити модифікований алгоритм Дейкстри, що враховує часову компоненту для прогнозування та ефективного уникнення конфліктів між агентами, а також оперативного реагування на динамічні перешкоди;
- е) імплементувати розроблений алгоритм у програмну симуляційну систему, забезпечивши наочну візуалізацію динаміки руху агентів;

ж) провести серію експериментальних досліджень, порівнявши ефективність розробленого алгоритму з модифікацією алгоритму Дейкстри за ключовими метриками, такими як час доставки, кількість зіткнень та час вирішення конфліктів.

На наш погляд найбільш ефективною, з точки зору параметрів продуктивності та надійності є розподілена система керування агенів. Але реалізація такої системи потребує доволі багатьох і великих досліджень та ресурсів, тому в даній роботі досліджується централізований варіант системи управління, що може стати основою для подальшої розподіленої реалізації. У такій системі дрони виконують роль сенсорів, що збирають дані про середовище (за допомогою "зору" та інших сенсорів) та передають їх до централізованого вузла. Централізований вузол, у свою чергу, якісно відстежує стан ситуації, будує глобальний граф маршрутів, аналізує всі дані, враховує розташування інших дронів (особливо тих, що знаходяться недалеко один від одного), і лише після цього віддає дронам конкретні команди для виконання. Дрони, таким чином, отримують лише команди і виконують їх, не займаючись самостійним глобальним плануванням.

Наукова новизна полягає у розробці та експериментальному підтвердженні ефективності модифікованого алгоритму Дейкстри для багатоагентного планування маршрутів, який інтегрує часову компоненту для динамічного уникнення конфліктів та реагування на мінливі умови середовища.

Практичне значення роботи полягає у створенні функціонального прототипу системи, здатної вирішувати актуальні задачі координації руху дронів у складних середовищах. Розроблена система може бути використана як основа для реального програмного забезпечення у сферах логістики, оборони та пошуково-рятувальних операцій, де безпека та ефективність є пріоритетними.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було успішно досягнуто поставленої мети – створено та експериментально апробовано модифікований алгоритм планування маршрутів для багатоагентної системи управління рухом нодів ройового комплексу, який забезпечує ефективне уникнення конфліктів між агентами та оптимізацію часу виконання завдань.

В процесі виконання роботи було проведено комплексний аналіз предметної області, який включав дослідження принципів функціонування багатоагентних систем, сучасних підходів до управління рухом агентів та існуючих алгоритмів планування маршрутів. Виявлено, що класичні алгоритми, такі як стандартний алгоритм Дейкстри, не враховують часову компоненту та не забезпечують ефективного уникнення конфліктів у динамічному багатоагентному середовищі.

Також було розроблено архітектуру централізованої системи управління, в якій дрони виступають як сенсори, що передають дані про середовище, а центральний вузол агрегує інформацію та координує рух усього рою. Така архітектура забезпечує глобальну оптимізацію маршрутів та ефективне вирішення конфліктів між агентами.

Створено математичну модель руху нодів, яка включає формалізацію простору функціонування у вигляді випадкового графа, визначення конфліктів у просторово-часовому вимірі та функції оцінки ваги ребер з урахуванням динамічних факторів.

Було розроблено модифікований алгоритм Дейкстри з інтегрованою часовою компонентою, який забезпечує:

- а) просторово-часове планування маршрутів з прогнозуванням потенційних конфліктів;
- б) динамічне коригування ваг ребер графа залежно від завантаженості маршрутів;

в) механізм затримок для уникнення одночасного перебування агентів у конфліктних точках;

г) адаптивність до появи динамічних перешкод через механізм перепланування.

Імплементовано програмну симуляційну систему з використанням мови Python та спеціалізованих бібліотек (NetworkX, NumPy, Shapely, Matplotlib). Система забезпечує візуалізацію руху агентів у реальному часі та збір статистичних даних для аналізу ефективності алгоритмів.

Проведено серію експериментальних досліджень на сценарії військової логістики з різною кількістю агентів (3, 5 та 8 дронів). Порівняльний аналіз з базовим алгоритмом збільшення ваг та супер-гібридним підходом показав, що розроблений алгоритм:

- а) досягає ідеальної ефективності шляхів (показник 1.0);
- б) забезпечує на 0.7% коротші маршрути порівняно з альтернативними підходами;
- в) ефективно мінімізує конфлікти вузлів (14 проти 15 у конкурентів);
- г) демонструє високу стабільність при збільшенні кількості агентів.

Наукова новизна роботи полягає в розробці оригінального підходу до багатоагентного планування, який поєднує переваги класичного алгоритму Дейкстри з механізмами просторово-часової координації та динамічної адаптації до змін середовища.

Практична цінність результатів підтверджується можливістю застосування розробленої системи в реальних сценаріях [13, 14], таких як військова логістика та оборонні операції, цивільні системи доставки вантажів, пошуково-рятувальні місії в зонах надзвичайних ситуацій та автоматизовані складські комплекси.

Основним обмеженням поточної реалізації є централізована архітектура, яка створює єдину точку відмови. Перспективними напрямками подальших досліджень є:

- а) перехід до гібридної або повністю розподіленої архітектури;

- б) інтеграція методів машинного навчання для прогнозування оптимальних параметрів;
- в) оптимізація алгоритму для роботи з роями понад 20 агентів;
- г) апаратна реалізація та тестування на реальних БПЛА.

Таким чином, розроблена багатоагентна система управління рухом нодів ройового комплексу є ефективним рішенням для координації автономних агентів у складних динамічних середовищах, що підтверджено результатами експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Купін А.І. Огляд архітектури мультиагентних систем та алгоритмів ройового інтелекту / А.І. Купін, М.П. Косей // Вчені записки. – 2024. – № 2. – С. 108-115. – Режим доступу: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/2_2024/2_2024.pdf#page=108 – Дата звернення: 19.04.2025.
2. Буряк Є.П. Мультиагентні системи в практиці віртуального управління процесом військових перевезень [Електронний ресурс] / Є.П. Буряк, В.О. Павлов, В.М. Храбан. – 2024. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/dc8fbf5b-f580-4f8f-b170-7b70e6c3ad38/content> – Дата звернення: 10.12.2024.
3. Li Hanxue. A Reliable Delivery Logistics System Based on the Collaboration of UAVs and Vehicles / Hanxue Li, Shuaiqi Zhu, Amr Tolba [та ін.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, № 17. – P. 12720. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/su151712720> – Дата звернення: 15.03.2025.
4. Швець Ю.О. Інформаційна технологія реконфігурації ройового комплексу на основі методів штучного інтелекту [Електронний ресурс] / Ю.О. Швець, Є.В. Малахов // Інформатика, інформаційні системи та технології. – 2024. – С. 200. – Режим доступу: <http://dspace.pdpu.edu.ua/bitstream/123456789/21944/1/Informatics%2C%20information%20systems.pdf#page=200> – Дата звернення: 20.03.2025.
5. Єна М. Контроль міської мобільності БПЛА: ройовий інтелект і уникнення зіткнень / М. Єна // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2024. – № 4 (30). – С. 59-66.
6. Танасійчук С. Аналіз методів і засобів керування автономними безпілотними літальними апаратами / С. Танасійчук // Measuring and Computing Devices in Technological Processes. – 2023. – № 4. – С. 127-133. –

- Режим доступу: <https://vottp.khmnu.edu.ua/index.php/vottp/article/view/197/179>
– Дата звернення: 18.04.2025.
7. Кир'янов А.Ю., Аналіз сучасних підходів до групового керування автономними безпілотними літальними апаратами // Зв'язок. – 2023. – № 5. – С. 40-47.
 8. Li J. Anytime multi-agent path finding via large neighborhood search / J. Li, Z. Chen, D. Harabor [та ін.] // International Joint Conference on Artificial Intelligence 2021. – AAAI, 2021. – PP. 4127-4135. – Режим доступу: <https://www.ijcai.org/proceedings/2021/> – Дата звернення: 12.04.2025.
 9. Alkazzi Jean-Marc. A comprehensive review on leveraging machine learning for multi-agent path finding [Електронний ресурс] / Jean-Marc Alkazzi, Keisuke Okumura // IEEE Access. – 2024. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10506521> – Дата звернення: 28.04.2025.
 10. Paul S. A survey of technologies supporting design of a multimodal interactive robot for military communication / S. Paul // Journal of Defense Analytics and Logistics. – 2023. – Vol. 7, № 2. – PP. 156-193. – Режим доступу: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/jdal-11-2022-0010/full/pdf>
– Дата звернення: 18.04.2025.
 11. Penko Oleksandr. Multiagent Path Finding using Dijkstra Algorithm / Oleksandr Penko, Valerii Pienko, Eugene Malakhov // 2024 IEEE 19th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT). – IEEE, 2024. – PP. 245-250.
 12. Альбрехт Й.О. Інформаційна технологія виявлення рухомих об'єктів у тривимірному просторі з використанням рою гетерогенних БПЛА [Електронний ресурс] / Й.О. Альбрехт. – Київ, 2024. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/items/fa3829a5-e262-4656-9fb3-a2a4602f0d0b> – Дата звернення: 26.03.2025.
 13. Kumar Pawan. Comprehensive Review of Path Planning Techniques for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) [Електронний ресурс] / Pawan Kumar,

Kunwar Pal, Mahesh Govil // ACM Computing Surveys. – 2025. – Режим доступу: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3737280> – Дата звернення: 02.05.2025.

14. Ткачук Т.М. Засоби підвищення ефективності системи управління дронами в сільському господарстві [Електронний ресурс] / Т.М. Ткачук. – Київ, 2024. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/items/30b3261f-f473-4823-9db2-d060591065a4> – Дата звернення: 04.05.2025.