

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА АВІОНІКИ ТА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Таранов Денис Володимирович

УДК 681.513.6 : 629.7.014.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ РЕКОНФІГУРАЦІЄЮ ТА
СТРУКТУРНИМ ЗЛИТТЯМ РОЇВ БПЛА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань

15 «Автоматизація та приладобудування»

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Д.В. Таранов

Науковий керівник

Синеглазов Віктор Михайлович

доктор технічних наук, професор

Київ 2026

Анотація

Таранов Д. В. – Методи адаптивного керування реконфігурацією та структурним злиттям роїв БПЛА в умовах невизначеності.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київський Авіаційний Інститут МОН України, Київ, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності та живучості ройових систем безпілотних літальних апаратів шляхом розробки методів їх адаптивної реконфігурації та децентралізованого керування. У роботі досліджено процеси групової взаємодії агентів в умовах активної радіоелектронної боротьби, відсутності сигналів глобальної навігації та високої динаміки втрат. Головним результатом дослідження є створення комплексу математичних моделей та алгоритмів, що поєднують методи ройового інтелекту, теорію графів та потенціальні поля, які дозволяють рою автономно змінювати формацію, уникати колізій та об'єднуватися з іншими групами без втрати керованості.

У першому розділі роботи проведено системний аналіз сучасного стану технологій керування групами дронів та виявлено критичні обмеження існуючих підходів. Зокрема, встановлено, що централізовані архітектури є вразливими до атак на керуючий вузол, а класичні децентралізовані протоколи не забезпечують достатньої швидкості реакції на зміни топології мережі в умовах урбаністичної забудови та дії засобів РЕБ. Сформульовано науково-технічне протиріччя між необхідністю надшвидкої реконфігурації рою та відсутністю алгоритмічного забезпечення для утримання зв'язності комунікаційного графа без єдиного центру керування. На основі цього визначено мету, об'єкт, предмет дослідження та поставлено завдання щодо розробки гібридних методів керування.

Другий розділ присвячено синтезу дворівневої системи адаптивного керування формацією окремого рою. Розроблено гібридний закон керування, який

інтегрує модифікований метод ройових частинок (PSO) з методом штучних потенціальних полів (APF) та елементами віртуальної структури. Ключовою особливістю запропонованого підходу є введення адаптивних вагових коефіцієнтів, які динамічно змінюються залежно від поточної похибки формації та щільності сусідів, що дозволяє вирішити проблему локальних мінімумів та забезпечити плавність траєкторій. Також у розділі обґрунтовано умови стійкості системи через спектральні властивості графа зв'язку та визначено межі застосовності різних методів утримання строю.

У третьому розділі вирішено задачу структурного синтезу об'єднаної мережі при злитті незалежних груп БПЛА. Розроблено протокол інкрементального злиття топологій, реалізований на базі скінченного автомата станів, що дозволяє об'єднувати рої без зупинки виконання місії та лавиноподібного зростання трафіку. Для забезпечення ефективної координації в новоствореній структурі запропоновано алгоритм асиметричного локального голосування (ALVCS), який використовує ймовірнісну модель для вибору координаторів на основі їхнього енергетичного потенціалу та якості зв'язку. Теоретичний аналіз підтвердив, що локальна обчислювальна складність цих алгоритмів не залежить від загального розміру рою, що гарантує їхню масштабованість.

Четвертий розділ містить результати експериментальної верифікації розроблених моделей за допомогою імітаційного моделювання у середовищі Python. Проведені дослідження підтвердили, що використання адаптивних коефіцієнтів у методі PSO скорочує час перешикувань на 32% та зменшує енерговитрати на 14% порівняно з класичними аналогами. Моделювання сценарію злиття роїв довело здатність розробленого протоколу утримувати стабільну алгебраїчну зв'язність мережі та забезпечувати безперервність керування навіть в умовах інтенсивної протидії та втрати частини агентів, демонструючи значну перевагу над періодичними стратегіями реконфігурації.

Ключові слова: рій БПЛА, адаптивне керування, методи керування, системи керування, авіаційні системи, PSO, штучні потенціальні поля, децентралізоване керування, реконфігурація формації БПЛА, злиття роїв БПЛА.

Список публікацій здобувача:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. "Algorithm for precise payload drop from FPV drone with account of wind strength and automatic position correction", Taranov D. V., Sineglazov V. M., Yudenko I. O. Electronics and Control Systems, 2024, № 3(81), С. 54-58. DOI: 10.18372/1990-5548.81.18993.
2. "Hybrid methodology for rebuilding a swarm of drones based on local capabilities and global coordination", Taranov D. V. Electronics and Control Systems, 2025, № 1(83), С. 35-41. DOI: 10.18372/1990-5548.83.19870.
3. "Prediction of moving targets and adaptive avoidance in hybrid PSO-MPC for a swarm of UAVs", Taranov D. V., Sineglazov V. M., Electronics and Control Systems, 2025, № 2(84), С. 76-83. DOI: 10.18372/1990-5548.84.20197.
4. "Decentralized local-priority communication protocol for small Unmanned aerial vehicle swarms", Taranov D. V., Sineglazov V. M., Electronics and Control Systems, 2025, № 3(85), С. 40-47. DOI: 10.18372/1990-5548.85.20430.

Матеріали та тези наукових доповідей:

5. "Використання методу максимальної маржі для інтелектуальної класифікації даних", Таранов Д.В., АВІА-2023: матеріали XVI міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 18-20 квітня 2023 р.)
6. "Нейромережева система автозахоплення та трекінгу цілі FPV дроном з автономним зворотним зв'язком", Таранов Д.В., Синєглазов В.М., «Авіація в XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології»: матеріали XI Всесвітнього конгресу (м. Київ, 26 вересня 2024) С. 2.3.25-.2.3.29
7. "Hybrid PSO-MPC for adaptive obstacle avoidance by UAV swarms", Taranov D.V., Sineglazov V.M., «MIT@AIS-2025»: 1st International Scientific and Practical Conference
8. "Гібридний підхід до динамічної перебудови формацій рою БПЛА на основі глобального планування та локального потенційного керування», Таранов Д.В., Синєглазов В.М., АВІА-2025: матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 23 квітня 2025 р.) С. 10.6 – 10.10
9. "Target interception using a multilayer UAV swarm formation", Taranov D. V., 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control. С. 316 - 320

Abstract

Taranov D. V. – Methods of adaptive control of reconfiguration and structural merging of UAV swarms in conditions of uncertainty.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 151 – "Automation and Computer-Integrated Technologies."

The dissertation is devoted to solving the urgent scientific and practical problem of increasing the efficiency and survivability of swarm systems of unmanned aerial vehicles by developing methods for their adaptive reconfiguration and decentralized control. The work investigates the processes of group interaction between agents in conditions of active electronic warfare, absence of global navigation signals, and high dynamics of losses. The main result of the research is the creation of a set of mathematical models and algorithms that combine swarm intelligence methods, graph theory, and potential fields, which allow the swarm to autonomously change formation, avoid collisions, and merge with other groups without losing controllability.

The first section of the paper provides a systematic analysis of the current state of drone swarm control technologies and identifies critical limitations of existing approaches. In particular, it has been established that centralized architectures are vulnerable to attacks on the control node, and classic decentralized protocols do not provide sufficient speed of response to changes in network topology in urban environments and under the influence of electronic warfare measures. A scientific and technical contradiction has been formulated between the need for ultra-fast swarm reconfiguration and the lack of algorithmic support for maintaining the connectivity of the communication graph without a single control center. Based on this, the goal, object, and subject of the study have been determined, and the task of developing hybrid control methods has been set.

The second section is devoted to the synthesis of a two-level adaptive control system for a single swarm formation. A hybrid control law has been developed that integrates a modified particle swarm optimization (PSO) method with an artificial potential field

(APF) method and elements of a virtual structure. A key feature of the proposed approach is the introduction of adaptive weight coefficients that change dynamically depending on the current formation error and neighbor density, which solves the problem of local minima and ensures smooth trajectories. The section also substantiates the conditions for system stability through the spectral properties of the connection graph and determines the limits of applicability of various methods of maintaining order.

The third section solves the problem of structural synthesis of a unified network when merging independent UAV groups. An incremental topology merging protocol has been developed, implemented on the basis of a finite state machine, which allows swarms to be merged without stopping the mission and without an avalanche-like increase in traffic. To ensure effective coordination in the newly created structure, an asymmetric local voting algorithm (ALVCS) is proposed, which uses a probabilistic model to select coordinators based on their energy potential and communication quality. Theoretical analysis has confirmed that the local computational complexity of these algorithms does not depend on the total size of the swarm, which guarantees their scalability.

The fourth section contains the results of experimental verification of the developed models using simulation modeling in the Python environment. The studies confirmed that the use of adaptive coefficients in the PSO method reduces the time of reordering by 32% and reduces energy consumption by 14% compared to classical analogues. Simulation of the swarm merger scenario proved the ability of the developed protocol to maintain stable algebraic connectivity of the network and ensure continuity of control even in conditions of intense opposition and loss of some agents, demonstrating a significant advantage over periodic reconfiguration strategies.

Keywords: UAV swarm, adaptive control, control methods, control systems, aviation systems, PSO, artificial potential fields, decentralized control, UAV formation reconfiguration, UAV swarm merging.

Зміст

Анотація	1
Перелік умовних позначень	10
Вступ.....	12
Мета і завдання дослідження	12
Об’єкт дослідження.....	13
Предмет дослідження.....	13
Методи дослідження	14
Наукова новизна одержаних результатів.....	14
Взаємозв’язок між об’єктом та предметом дослідження.....	15
Завдання дослідження.....	16
Методи дослідження	17
Очікувані результати	20
Наукова новизна одержаних результатів.....	21
Апробація результатів дисертації.....	22
Публікації.....	23
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ РОЇВ БПЛА: ФОРМАЦІЇ, МЕХАНІЗМИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ	24
1.1 Рої дронів, їх ознаки та застосування.....	24
1.1.2 Архітектурні моделі рою	25
1.1.3. Приклади практичних застосувань.....	29
1.1.4. Порівняльний аналіз існуючих платформ та їх обмежень.....	32
1.2 Основні типи формації дронів	34
1.2.1. Статичні формації (лінійна, багатокутна)	37
1.2.2. Динамічні формації (лінійні/паралельні зсуви, круговий рух)	41
1.2.3 Адаптивні формації.....	43
1.2.4. Порівняльний аналіз переваг і недоліків кожного типу	45
1.3. Завдання, які виконують рої дронів	48
1.3.1 Структурний аналіз завдань рою БПЛА та відповідний вибір формацій ..	48
1.3.2. Взаємодія дронів у рою	50

1.4 Перспективи використання роїв БПЛА у бойових і розвідувальних сценаріях	54
1.4.1 Сценарії високої складності та GPS-denied середовище.....	55
1.4.2 Рої як мультифункціональні платформи - поєднання розвідки, удару та радіоелектронної боротьби.....	56
1.4.3 Тенденції розвитку: автономія, координація зі штучним інтелектом та мікропрої	57
1.5 Постановка задачі адаптивної зміни формації.....	58
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТА УТРИМАННЯ ФОРМАЦІЇ ДРОНІВ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ В БОЙОВИХ ТА РОЗВІДУВАЛЬНИХ МІСІЯХ	61
2.1 Критерії та метрики вибору формації	64
2.2 Алгоритми зміни та технічне утримання формацій	71
2.2.1 Просторова модель рою і позначення.....	72
2.2.2 PSO-правила оновлення для динамічного зміщення формації	73
2.2.3 Оптимізація конфігураційного параметра θ	78
2.2.4 Топологічні обмеження та консенсус у мережі керування.....	79
2.2.5 Постановка задачі адаптивної зміни формації рою	80
2.3 Види алгоритмів утримання формації рою	82
2.3.1 Консенсусні алгоритми утримання формації.....	82
2.3.2 Поведінкові алгоритми утримання формації (Flocking-Based Control).....	83
2.3.3 Управління формацією через штучні потенційні поля (APF)	85
2.4 Висновки до розділу	89
РОЗДІЛ 3. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АЛГОРИТМІВ ЗЛИТТЯ РОЇВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	91
3.1. Математична постановка задачі структурного синтезу об'єднаної мережі .	91
3.2 Архітектура запропонованого підходу до злиття роїв.....	93
3.3 Протокол інкрементального злиття як скінченний автомат.....	95
3.4 Алгоритм асиметричного локального голосування (ALVCS): ймовірнісна модель вибору координаторів рою.....	99
3.5. Аналіз обчислювальної складності алгоритмів (Computational Complexity Analysis).....	103
3.6. Аналітична оцінка часових характеристик та динаміки перехідних процесів	106
3.6.1. Декомпозиція часової затримки злиття	107

3.6.2. Спектральний аналіз швидкості збіжності	108
3.7. Висновки	110
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ	112
4.1. Методика проведення досліджень та опис програмного середовища моделювання	112
4.1.1. Обґрунтування вибору середовища моделювання	112
4.1.2. Математична модель агента та середовища	112
4.1.3. Параметри моделювання та сценарії	113
4.1.4. Критерії оцінки ефективності	114
4.2. Дослідження динаміки адаптивної реконфігурації рою	114
4.3. Моделювання процесу інкрементального злиття роїв та аналіз мережевої зв'язності	117
4.4. Порівняльний аналіз живучості системи при використанні періодичної та подієвої стратегій реконфігурації	120
4.5. Висновки до розділу	122

Перелік умовних позначень

БПЛА - Безпілотний літальний апарат

ППО - Протиповітряна оборона

РЕБ - Радіоелектронна боротьба

ALVCS - Asymmetric Local Voting for Coordinator Selection (Асиметричне локальне голосування для вибору координатора)

APF - Artificial Potential Fields (Штучні потенціальні поля)

CODE - Collaborative Operations in Denied Environment (Спільні операції в умовах забороненого доступу)

EKF - Extended Kalman Filter (Розширений фільтр Калмана)

FANET - Flying Ad-hoc Network (Літаюча однорангова мережа)

FSM - Finite State Machine (Скінченний автомат)

GNSS - Global Navigation Satellite System (Глобальна навігаційна супутникова система)

GPS - Global Positioning System (Глобальна система позиціонування)

IMU - Inertial Measurement Unit (Інерціальний вимірювальний модуль)

LiDAR - Light Detection and Ranging (Технологія вимірювання відстані за допомогою світла)

MANET - Mobile Ad-hoc Network (Мобільна однорангова мережа)

NLOS - Non-Line-of-Sight (Відсутність прямої видимості)

PSO - Particle Swarm Optimization (Оптимізація роєм частинок)

QoS - Quality of Service (Якість обслуговування)

RSSI - Received Signal Strength Indicator (Індикатор рівня прийнятого сигналу)

RTT - Round Trip Time (Час кругової затримки сигналу)

SAR - Search and Rescue (Пошук і рятування)

SLAM - Simultaneous Localization and Mapping (Одночасна локалізація та побудова карти)

SNR - Signal-to-Noise Ratio (Відношення сигнал/шум)

UWB - Ultra-Wideband (Надширокосмуговий зв'язок)

VS - Virtual Structure (Віртуальна структура)

Вступ

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку безпілотних авіаційних систем характеризується переходом від використання поодиноких апаратів до застосування автономних груп — роїв БПЛА. Такі системи демонструють високу ефективність у задачах масштабного моніторингу, агроінженерії, логістики, а також у військовій сфері: для колективної розвідки, кооперативного цілевказання та перенасичення систем протиповітряної оборони супротивника.

Ключовими перевагами ройових архітектур є децентралізація, масштабованість та живучість. Водночас аналіз бойового досвіду та існуючих платформ (Perdix, LOCUST, CODE) свідчить, що більшість сучасних рішень ефективні лише за умов стабільного зв'язку та доступності сигналів глобальної навігації (GNSS). В умовах активної радіоелектронної боротьби (РЕБ) та дії в урбанізованому середовищі («urban canyons») класичні методи керування, що базуються на фіксованих формаціях або централізованому лідерстві, втрачають працездатність.

Існує невирішене науково-технічне протиріччя між оперативною необхідністю забезпечення надшвидкої адаптивної реконфігурації та злиття роїв для збереження їх живучості та відсутністю алгоритмічного забезпечення, яке б гарантувало утримання зв'язності комунікаційного графа без єдиного центру керування. Це зумовлює необхідність розробки нових математичних моделей і методів адаптивного керування, що й визначає актуальність дисертаційного дослідження.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності та живучості роевих систем БПЛА в умовах динамічної невизначеності та радіоелектронних завад шляхом розробки методів адаптивної реконфігурації формації та децентралізованого злиття груп.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити математичну модель адаптивного керування формацією, що поєднує методи ройового інтелекту з потенціальними полями для забезпечення плавності траєкторій.
2. Синтезувати алгоритм інкрементального злиття роєвих топологій (Incremental Topology Fusion) для об'єднання незалежних груп БПЛА без зупинки місії.
3. Розробити метод динамічного розподілу ролей (ALVCS) на основі асиметричного локального голосування для координації гетерогенних роїв.
4. Провести експериментальне дослідження розроблених методів шляхом імітаційного моделювання та оцінити їхню ефективність.

Об'єкт дослідження

Об'єкт дослідження — є процеси децентралізованого групового керування та інформаційно-комунікаційної взаємодії в автономних ансамблях (роях) безпілотних літальних апаратів. Зокрема, досліджуються процеси самоорганізації агентів для адаптивної реконфігурації просторової структури рою, динамічного узгодження (консенсусу) параметрів руху та структурного синтезу об'єднаних комунікаційних топологій. Ці процеси розглядаються в контексті функціонування системи в умовах апріорної невизначеності навколишнього середовища, наявності стохастичних збурень, обмеженості бортових енергетичних та обчислювальних ресурсів, а також цілеспрямованого радіоелектронного придушення каналів зв'язку та глобальної навігації.

Предмет дослідження

Предметом дослідження — є математичні моделі, методи та алгоритми адаптивної просторово-часової синхронізації, реконфігурації формацій та структурного злиття гетерогенних груп БПЛА, зокрема:

- гібридні математичні моделі динаміки рою, що поєднують модифіковану оптимізацію ройових частинок (PSO) з адаптивними ваговими коефіцієнтами та метод штучних потенціальних полів (APF) для забезпечення плавності траєкторій та уникнення колізій у щільних групах;

- методи підтримки алгебраїчної зв'язності, які базуються на спектральному аналізі лапласіана графа комунікаційної мережі та дозволяють оцінювати і гарантувати структурну цілісність рою в умовах стохастичного руйнування каналів передачі даних під дією засобів РЕБ;
- алгоритми інкрементального злиття топологій, які формалізують процес об'єднання незалежних кластерів БПЛА через механізм скінченних автоматів та шлюзових вузлів, забезпечуючи безперервність керування під час структурних змін мережі;
- механізми асиметричного локального голосування (ALVCS), що використовують ймовірнісні моделі прийняття рішень на основі мультипараметричної функції корисності для динамічного перерозподілу ролей координації без наявності глобального лідера.

Методи дослідження

У роботі використано: теорію графів та матричний аналіз (для опису топології мережі та оцінки зв'язності); методи ройового інтелекту та еволюційної оптимізації (для синтезу траєкторій та мінімізації енерговитрат); теорію автоматичного керування (для забезпечення стійкості контурів); імітаційне моделювання (для верифікації алгоритмів).

Наукова новизна одержаних результатів

- 1. Розроблено** протокол інкрементального злиття топологій (Incremental Topology Fusion) на основі скінченного автомата станів, який, на відміну від існуючих методів повної реконфігурації, дозволяє об'єднувати незалежні рої «на льоту» зі збереженням алгебраїчної зв'язності мережі.
- 2. Удосконалено** метод керування формацією шляхом гібридизації модифікованого алгоритму ройових частинок (PSO) та методу штучних потенціальних полів (APF) із введенням адаптивних вагових коефіцієнтів, що залежать від похибки формації, що дозволило забезпечити баланс між глобальним пошуком та локальною стабілізацією.

3. Набув подальшого розвитку метод динамічного розподілу ролей у децентралізованих системах. Запропонований алгоритм асиметричного локального голосування (ALVCS) відрізняється використанням ймовірнісної моделі на основі мультипараметричної функції корисності, що забезпечує швидкий вибір координаторів без досягнення глобального консенсусу.

Взаємозв'язок між об'єктом та предметом дослідження

В дисертаційній роботі має чіткий причинно-наслідковий та інструментальний характер, де предмет дослідження виступає теоретичним та алгоритмічним інструментарієм для опису, оптимізації та вдосконалення об'єкта. Якщо об'єктом є самі процеси децентралізованого керування та інформаційної взаємодії в роях БПЛА, то предмет складають математичні моделі та алгоритми (гібридний PSO, APF, інкрементальне злиття), які створюються саме для того, щоб ці процеси могли відбуватися ефективно, автономно та надійно в умовах невизначеності.

Цей зв'язок проявляється у спрямованості предмета на вирішення конкретних проблемних ситуацій, властивих об'єкту. Оскільки проблематика об'єкта полягає у ризику втрати керованості та розриві комунікаційних зв'язків рою під дією засобів радіоелектронної боротьби, предмет дослідження пропонує конкретні рішення у вигляді методів підтримки алгебраїчної зв'язності та алгоритми реконфігурації, які дозволяють процесам керування адаптуватися до цих критичних умов.

Крім того, простежується чітка структурна відповідність між складовими об'єкта та предмета. Процесу просторової координації агентів відповідають розроблені гібридні моделі руху на основі потенціальних полів, процесу об'єднання незалежних груп — синтезований протокол інкрементального злиття топологій, а процесу прийняття рішень у гетерогенній групі — розроблений метод асиметричного локального голосування. Отже, взаємозв'язок полягає у формуванні нових методів і моделей, які забезпечують якісно новий рівень

функціонування процесів керування та взаємодії в умовах, де класичні підходи є неефективними.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

1. Аналіз сучасного стану та проблематики керування групами БПЛА: Провести аналіз існуючих архітектур (централізованих, децентралізованих, гібридних) та методів координації роїв, визначити їхні обмеження в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ) та відсутності сигналів глобальної навігації (GPS-denied).
2. Визначення вимог до адаптивних роєвих систем: Сформулювати ключові вимоги до алгоритмів керування, враховуючи необхідність надшвидкої реконфігурації, утримання зв'язності комунікаційного графа та специфіку виконання розвідувальних і ударних місій в урбанізованому середовищі.
3. Розробка математичних моделей адаптивного керування формацією: Розробити гібридну модель руху, що інтегрує модифікований метод роєвих частинок (PSO) з адаптивними ваговими коефіцієнтами та метод штучних потенціальних полів (APF). Це дозволить автоматизувати процес утримання строю та гарантувати уникнення колізій при маневруванні.
4. Синтез алгоритмів динамічного злиття топологій: Розробити протокол інкрементального злиття (Incremental Topology Fusion) на основі розподіленого скінченного автомата та механізму шлюзових вузлів, що забезпечує об'єднання незалежних груп БПЛА «на льоту» без втрати керованості та лавиноподібного зростання трафіку.
5. Розробка методів децентралізованої координації та розподілу ролей: Запропонувати метод асиметричного локального голосування (ALVCS) для динамічного вибору координаторів у гетерогенних роях.

Визначити ймовірнісні критерії вибору, що враховують енергетичний потенціал, якість зв'язку та топологічне положення агентів.

6. Обґрунтування критеріїв та метрик оцінки ефективності: Сформулювати систему кількісних метрик (алгебраїчна зв'язність графа, час збіжності, енергоефективність, точність формації) для оцінювання якості керування роєм та стійкості мережі в перехідних процесах.
7. Розробка програмного забезпечення для імітаційного моделювання: Реалізувати програмний комплекс агентного моделювання (на мові Python), що відтворює динаміку польоту, роботу сенсорів та комунікаційних протоколів в умовах стохастичних збурень та протидії РЕБ.
8. Експериментальна перевірка запропонованих методів: Провести серію експериментів для сценаріїв адаптивної реконфігурації, зустрічного злиття роїв та роботи в умовах відмови вузлів. Порівняти отримані результати з класичними методами (стандартний PSO, періодична кластеризація) для підтвердження ефективності розроблених рішень.
9. Аналіз обчислювальної складності та масштабованості: Дослідити асимптотичну складність запропонованих алгоритмів (зокрема локальну складність та оцінити можливість їх реалізації на бортових обчислювачах тактичних БПЛА з обмеженими ресурсами).

Методи дослідження

Для розв'язання задачі адаптивного керування, реконфігурації та структурного злиття роїв безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах динамічної невизначеності використовується комплекс теоретичних, експериментальних та імітаційних методів. Особливу увагу приділено гібридизації методів ройового інтелекту з детермінованими підходами теорії автоматичного керування для забезпечення гарантованої стійкості системи.

Методи математичного моделювання. Використовуються для формального опису динаміки руху агентів та топології мережі, що включає опис кінематики БПЛА за моделлю подвійного інтегратора для розрахунку траєкторій, використання алгебраїчної теорії графів для моделювання комунікаційної мережі, де вузли відповідають агентам, а ребра — активним каналам зв'язку, та застосування спектральної теорії графів (аналіз матриці Лапласа та числа Фідлера) для оцінки зв'язності та керованості рою в процесі реконфігурації.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено програмний комплекс імітаційного моделювання ройової поведінки мовою Python. Результати експериментів підтвердили, що запропоновані методи дозволяють скоротити час реконфігурації формації на 32%, зменшити енерговитрати на 14% та забезпечити час узгодження при злитті роїв не більше 1,5 с, що є критично важливим для тактичних застосувань.

Методи ройового інтелекту та оптимізації. Застосовуються для синтезу керуючих впливів та розподілу цілей у групі. У цьому контексті модифікований метод оптимізації ройових частинок (PSO) виступає як адаптивний механізм для глобальної навігації, де класичні рівняння оновлення швидкості доповнені адаптивними ваговими коефіцієнтами, що динамічно змінюються залежно від похибки формації. Це дозволяє знаходити баланс між глобальним пошуком траєкторії та локальною стабілізацією строю.

Метод штучних потенціальних полів (APF). Використовується для забезпечення безпеки польоту та локального уникнення колізій. Реалізується через формування віртуального енергетичного ландшафту, де перешкоди та сусідні агенти генерують відштовхувальні сили, а цільові точки формації — притягувальні. Гібридизація APF із PSO дозволяє уникнути проблеми локальних мінімумів, характерної для класичних градієнтних методів.

Теорія скінченних автоматів та дискретна математика. Застосовується для формалізації логіки структурного синтезу мережі при злитті роїв. Процес

об'єднання незалежних груп описується як робота розподіленого скінченного автомата (FSM), що дозволяє детермінувати переходи між станами сканування, рукостискання, синхронізації та стабілізації, гарантуючи відсутність невизначених станів алгоритму.

Теорія ймовірностей і статистики. Використовується в розробленому методі асиметричного локального голосування (ALVCS) для динамічного вибору координаторів. Імовірнісні моделі (зокрема функція Softmax) застосовуються для розрахунку шансів вузла стати лідером на основі мультипараметричної функції корисності, що враховує заряд батареї та якість зв'язку. Також статистичні методи використовуються для моделювання стохастичних процесів втрати пакетів та завад у радіоканалі.

Імітаційне моделювання. Реалізується через створення спеціалізованого програмного середовища агентного моделювання мовою Python із використанням бібліотек NumPy та NetworkX. Експерименти спрямовані на верифікацію кінематичних параметрів руху рою, дослідження динаміки перехідних процесів при зміні формації, оцінку стійкості алгоритмів злиття до часових затримок та втрат зв'язку, а також перевірку енергоефективності запропонованих підходів.

Методи порівняльного аналізу. Для об'єктивної оцінки ефективності розроблених рішень проводиться порівняння їхньої продуктивності з класичними методами керування. Зокрема, порівнюється час збіжності та точність утримання формації адаптивного PSO з класичним PSO з фіксованими параметрами, а також аналізується живучість мережі при використанні подієвого методу ALVCS у порівнянні з традиційною періодичною кластеризацією.

Оцінка обчислювальної складності. Застосовується для аналізу можливості реалізації розроблених алгоритмів на бортових обчислювачах з обмеженими ресурсами. Проводиться теоретична оцінка асимптотичної часової та

просторової складності алгоритмів, що дозволяє підтвердити їх масштабованість (локальну складність для великих груп агентів).

Очікувані результати

Виконання дисертаційної роботи дозволить отримати нові науково-обґрунтовані теоретичні та практичні результати, спрямовані на вирішення задачі адаптивного керування роями БПЛА в умовах невизначеності. Зокрема, очікується удосконалення математичних моделей керування рухом шляхом створення гібридної архітектури, яка поєднує методи ройового інтелекту та штучних потенціальних полів. Це дозволить забезпечити автономну адаптацію формації рою до змін навколишнього середовища, гарантуючи плавність траєкторій та уникнення колізій у щільних групах без необхідності централізованого втручання.

Вагомим результатом стане забезпечення структурної цілісності при об'єднанні груп завдяки розробці та верифікації протоколу інкрементального злиття топологій. Цей підхід дозволить об'єднувати незалежні рої в єдину інформаційну мережу безпосередньо під час виконання завдання, забезпечуючи безперервність керування та збереження зв'язності комунікаційного графа під час динамічних змін структури.

Підвищення живучості системи керування буде досягнуто завдяки впровадженню методу асиметричного локального голосування, що дозволить створити відмовостійку архітектуру координації. Очікується, що це надасть рою здатність автоматично перерозподіляти ролі координаторів у разі втрати окремих агентів або погіршення якості зв'язку, забезпечуючи функціонування опорної мережі без єдиної точки відмови.

Практична цінність роботи полягає у створенні програмного комплексу імітаційного моделювання, що дозволить досліджувати поведінку великих груп БПЛА в умовах стохастичних збурень та протидії засобам радіоелектронної боротьби, верифікуючи алгоритми до етапу натурних випробувань.

Застосування розроблених методів дозволить суттєво зменшити час, необхідний на реконфігурацію строю, та знизити енергетичні витрати на маневрування, що забезпечить підвищення оперативної гнучкості та автономності тактичних груп БПЛА при виконанні завдань в умовах відсутності глобальної навігації.

Наукова новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують важливу науково-прикладну задачу підвищення ефективності та живучості ройових систем БПЛА в умовах динамічної невизначеності та дії радіоелектронних завад:

1. Розроблено метод побудови (створення) формації рою дронів, який відрізняється від відомих використанням модифікованого алгоритму ройових частинок (PSO) з нелінійною адаптацією вагових коефіцієнтів. Це дозволило вирішити задачі побудови та перебудови формації в залежності від зовнішніх умов із практичним покращенням динаміки: усунуто осциляції траєкторій на фінальній стадії зближення, скорочено час перехідного процесу реконфігурації на 32% та зменшено сумарні енергетичні витрати на маневрування на 14% .
2. Розроблено метод управління формацією рою БПЛА, який відрізняється від відомих інтеграцією методу штучних потенційних полів змінної метрики в контур керування. Це забезпечує практичне вдосконалення безпеки польоту: гарантує уникнення колізій між агентами у щільних групах (збереження дистанції вище критичного порогу) та забезпечує плавність траєкторій без застрягання в локальних мінімумах, що дозволяє виконувати агресивні маневри в обмеженому просторі.
3. Розроблено новий принцип побудови алгоритмів злиття роїв БПЛА, який відрізняється від відомих застосуванням протоколу інкрементального злиття на основі скінченного автомата станів. Це надає можливість виконувати об'єднання груп «на льоту» без зупинки

місії, що практично зменшує час узгодження інформаційної структури до 1,5 с (проти 3–5 с у класичних підходах) та запобігає лавиноподібному зростанню службового трафіку, забезпечуючи стабільність мережі.

4. Розроблено новий метод структурного синтезу об'єднаної мережі дронів, який відрізняється від інших використанням механізму шлюзових вузлів та спектрального контролю графа. Це дозволяє практично гарантувати збереження алгебраїчної зв'язності мережі ($\lambda_2 > 0$) протягом усього маневру злиття, що унеможливорює втрату керованості та фрагментацію рою на ізольовані кластери в умовах радіоелектронних завад.
5. Розроблено новий підхід дослідження та верифікації адаптивних алгоритмів управління роями, який заснований на агентній математичній моделі з урахуванням ресурсних обмежень та стохастичних збурень середовища. Це дало можливість провести машинне моделювання динаміки адаптивної реконфігурації та підтвердити масштабованість алгоритмів (локальна обчислювальна складність $O(1)$), що доводить можливість їх реалізації на бортових мікроконтролерах тактичних БПЛА з обмеженими обчислювальними ресурсами.

Апробація результатів дисертації.

1. "Використання методу максимальної маржі для інтелектуальної класифікації даних", Таранов Д.В., АВІА-2023: матеріали XVI міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 18-20 квітня 2023 р.)
2. "Нейромережева система автозахоплення та трекінгу цілі FPV дроном з автономним зворотним зв'язком", Таранов Д.В., Синєглазов В.М., «Авіація в XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології»: матеріали XI Всесвітнього конгресу (м. Київ, 26 вересня 2024) С. 2.3.25-.2.3.29

3. "Hybrid PSO-MPC for adaptive obstacle avoidance by UAV swarms", Taranov D.V., Sineglazov V.M., «MIT@AIS-2025»: 1st International Scientific and Practical Conference
4. "Гібридний підхід до динамічної перебудови формацій рою БПЛА на основі глобального планування та локального потенційного керування», Таранов Д.В., Синєглазов В.М., АВІА-2025: матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 23 квітня 2025 р.) С. 10.6 – 10.10
5. "Target interception using a multilayer UAV swarm formation", Taranov D. V., 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control.

Публікації.

1. "Algorithm for precise payload drop from FPV drone with account of wind strength and automatic position correction", Taranov D. V., Sineglazov V. M., Yudenko I. O. Electronics and Control Systems, 2024, № 3(81), С. 54-58. DOI: 10.18372/1990-5548.81.18993.
2. "Hybrid methodology for rebuilding a swarm of drones based on local capabilities and global coordination", Taranov D. V. Electronics and Control Systems, 2025, № 1(83), С. 35-41. DOI: 10.18372/1990-5548.83.19870.
3. "Prediction of moving targets and adaptive avoidance in hybrid PSO-MPC for a swarm of UAVs", Taranov D. V., Sineglazov V. M., Electronics and Control Systems, 2025, № 2(84), С. 76-83. DOI: 10.18372/1990-5548.84.20197.
4. "Decentralized local-priority communication protocol for small Unmanned aerial vehicle swarms", Taranov D. V., Sineglazov V. M., Electronics and Control Systems, 2025, № 3(85), С. 40-47. DOI: 10.18372/1990-5548.85.20430.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ РОЇВ БПЛА: ФОРМАЦІЇ, МЕХАНІЗМИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Рої дронів, їх ознаки та застосування.

Рої безпілотних літальних апаратів (БПЛА) уявляють собою сукупність відносно простих автономних агентів, які, виконуючи локальні правила координації, породжують складну колективну поведінку без єдиного центру керування [1]. Ключові властивості таких систем - децентралізація прийняття рішень, масштабованість при збільшенні числа апаратів та взаємодія через обмін мінімальним набором даних - забезпечують живучість і гнучкість навіть у разі втрат окремих одиниць [8].

У цивільних застосуваннях рої БПЛА показали високу ефективність у масштабному моніторингу інфраструктури, агромоніторингу й логістиці «останньої милі». Водночас у військовій та розвідувальній діяльності вони відкривають принципово нові можливості:

- колективна розвідка великих або складних зон із одночасним картографуванням і виявленням рухомих цілей;
- кооперативне цілевказання та корекція вогню, що дозволяє підвищити точність і швидкість реакції власних сил;
- комбіновані атаки «камікадзе» для перевантаження систем протиповітряної оборони супротивника;
- обхід GPS-denied зон і активних перешкод завдяки динамічній перебудові формацій і адаптивному маршрутуванню [1], [7].

Саме ці вимоги - миттєва адаптація до умов поля бою, стійкість до втрат і перешкод, а також здатність до автономного ухвалення рішень - зумовили вибір напрямів дослідження, які ляжуть в основу цієї дисертації. Зокрема, ми прагнемо інтегрувати модифікований Particle Swarm Optimization із нейромережевими

агентними модулями для забезпечення надшвидкої та відмовостійкої реконфігурації формацій у реальному часі.

1.1.2 Архітектурні моделі рою

У централізованій архітектурі всі безпілотники підпорядковані єдиному «мозку» – потужному обчислювальному вузлу або командному центру, який збирає телеметрію від кожного агента, виконує глобальне планування траєкторій і розсилає індивідуальні команди руху. Цей підхід нагадує класичні системи «лідер–фоловер», де кожен «фоловер» точно виконує накази центральної одиниці. Завдяки наявності повної інформації про стан рою, центральний контролер може прогнозувати потенційні колізії, оптимально розподілити ролі в групі й виконати комплексне багатокритеріальне планування (наприклад, мінімізація енергоспоживання чи часу місії) з високою точністю [1].

Проте втрата зв'язку з контролером або вихід його з ладу робить весь рій нефункціональним: агенти не мають незалежних механізмів самостійного ухвалення рішень і просто «завмирають» при відсутності команд. Крім того, коли кількість БПЛА зростає, навантаження на канал зв'язку та обчислювальні ресурси центрального вузла збільшується експоненційно, що може призводити до затримок і втрати пакетів даних. Саме тому централізовані системи найчастіше застосовують у сценаріях з невеликою кількістю агентів або там, де необхідна надвисока точність координації, наприклад під час запуску рою з борту носія чи в демонстраційних польотах високоточної когорти [1].

Військові застосування централізованих роїв обмежені через вразливість до атаки на «мозок» системи. Проте в операціях типу керованого удару з боку авіаційного носія або під час синхронізованих показових польотів саме централізований контроль дозволяє досягти кібернетичної та тактичної точності, необхідної для одночасного наведення на кілька цілей із мінімальним часом розгортки.

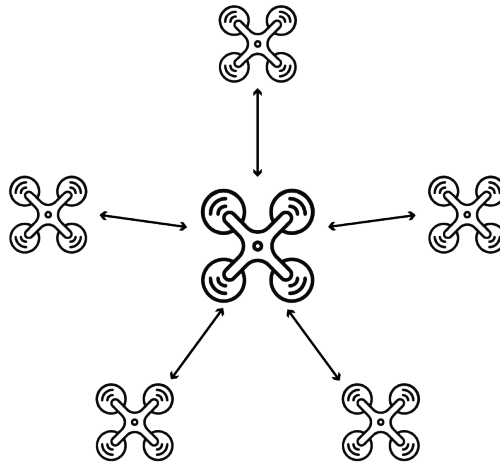


Рис. 1. Централізована архітектура

У децентралізованій архітектурі немає єдиного «керуючого мозку» – кожен БПЛА наділений алгоритмами локального прийняття рішень та може безпосередньо обмінюватися інформацією з кількома найближчими сусідами. Цей підхід ґрунтується на створенні ad hoc мережі, де кожен агент підтримує таблицю сусідів і періодично передає короткі повідомлення про свій стан: позицію, швидкість, рівень навантаження й доступні ресурси.

Коли всі дрони виконують однакові локальні правила узгодження (наприклад, на основі протоколів консенсусу чи моделей потенційних полів), з’являється глобальна формація без будь-якого централізованого планувальника. Така архітектура значно підвищує живучість рою: вихід з ладу навіть десятка апаратів не руйнує мережу цілком і лише дещо знижує пропускну здатність комунікаційної топології.

Недоліком є підвищені вимоги до складності протоколів взаємодії. Щоби уникнути локальних конфліктів у траєкторіях і забезпечити узгоджене рухом формування, кожен дрон змушений виконувати кілька ітерацій обміну повідомленнями, передбачати затримки передачі та коригувати свої команди відповідно до прогнозів сусідів. Це створює складне завдання синхронізації і може призводити до затримок у швидкоплинних бойових сценаріях.

Втім, у практичних випробуваннях децентралізовані рої продемонстрували здатність діяти в умовах повного глушіння GPS і централізованих каналів управління. Наприклад, у рамках програми DARPA CODE сотні БПЛА змогли зберегти форму та завершити розвідувальну місію, передаючи дані винятково через локальні ad hoc канали, коли радіоперешкоди унеможливили будь-який зв'язок із оператором [4].

У військовому контексті децентралізована архітектура особливо цінна в зоні активної радіоелектронної боротьби (Electronic Warfare), оскільки рій здатен автоматично переключатися на альтернативні шляхи обміну даними та зберігати здатність до колективної дії без централізованого втручання. Це забезпечує безперервність розвідки та коригування вогню навіть у найсуворіших умовах поля бою.

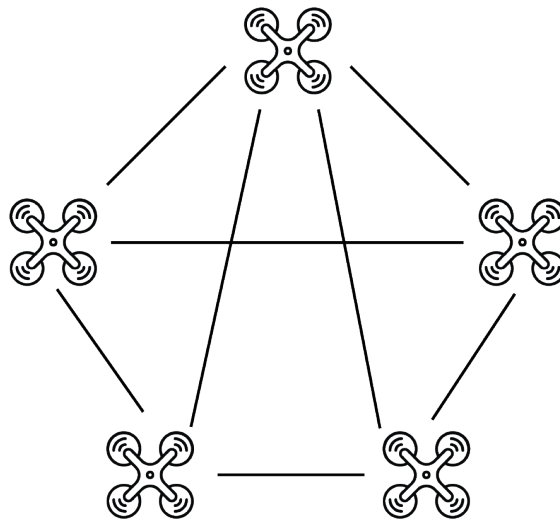


Рис. 2. Децентралізована архітектура

Гібридна архітектура поєднує елементи як централізованого, так і децентралізованого керування, прагнучи використати їхні сильні сторони й мінімізувати вразливості. У такій моделі деякі функції, зокрема глобальне планування маршрутів чи завдань, виконуються централізованим контролером на початковому

етапі місії. Після цього дрони переходять у режим децентралізованої координації для підтримки формації й реакції на локальні перешкоди.

Наприклад, перед стартом керівний центр може розрахувати оптимальні початкові точки розгортання, орієнтовні траєкторії та розподіл ролей (лідери підгруп, ретранслятори). Після виходу у повітря дрони зберігають ці орієнтири, але детальне ухвалення рішень про ухилення від перешкод чи локальну перебудову формації відбувається на борту в децентралізованому режимі.

Ключова перевага гібридної моделі - баланс між точністю глобального планування та гнучкістю локальної адаптації. Якщо децентралізовані агенти виявляють критичну загрозу чи суттєве відхилення від початкового плану, вони можуть передати сигнал лідеру для перерахунку маршруту в централізованому режимі. А після отримання оновленої стратегії знов перейти на автономні локальні правила.

У військових операціях така модель дозволяє:

- **Планувати масштабні рейди** з урахуванням загальних цілей (припустимі шляхи, часові рамки), але водночас
- **Миттєво реагувати** на неочікувані загрози (ППО, мінні пастки) шляхом локальної перебудови формації.

Демонстрації гібридних систем включали випробування, в яких центральний контролер задавав стратегічні цілі, тоді як декілька підгруп дронів виконували самостійно тактичні маневри завдяки децентралізованим протоколам. Результати підтвердили, що гібридна архітектура забезпечує найкраще поєднання ефективності та стійкості в умовах складного рельєфу й активного радіопротидії.

1.1.3. Приклади практичних застосувань

У військовому контексті рої безпілотників широко застосовуються для колективної розвідки та картографування зон відповідальності. Завдяки масштабованості системи та паралельній обробці сенсорних даних сотні дрібних апаратів можуть одночасно сканувати територію, формувати тривимірні цифрові карти місцевості й виявляти рухомі цілі. Зокрема, методи «target enclosing» на основі ентропійних моделей покриття дозволяють рою оперативно зосередити свої ресурси навколо вразливої або цінної мети та підтримувати навколишнє спостереження зі всіх боків[6]

У симуляційних експериментах Szyguła et al. показали, що децентралізований рій з п'яти мультикоптерних БПЛА здатен у режимі реального часу виявити скриту рухому мету в умовах щільного міського середовища, використовуючи лише локальний обмін координатами та швидкостями без централізованого планувальника[7]. Такий підхід є критичним для розвідувальних завдань, коли супротивник використовує засоби радіоелектронної протидії (jamming) або GPS-denied середовища. Крім цього, агенти рою можуть брати участь у кооперативній системі супутникового спостереження, організовуючи сітку з безперервним радіолокаційним контролем, що значно ускладнює противнику можливість приховати рух техніки чи живої сили.

Окрім розвідувальних операцій, рої БПЛА активно використовуються для кооперативного цілевказання та вогневого ураження. У так званих «swarm strike» місіях десятки-сотні дрібних безпілотників можуть одночасно виходити на ціль, створюючи масований залп, який здатний перевантажити систему ППО противника. Завдяки швидкій динамічній перебудові формації та паралельній оптимізації траєкторій за допомогою PSO, рій здатен адаптуватися до розташування ворожих батарей і обходити зони найщільнішого вогню [5].

У випробуваннях програми DARPA OFFSET рої з понад 100 мультикоптерів демонстрували спільний удар по «живих» цілях-макетах, використовуючи централізоване планування на старті, а потім повністю децентралізоване ухвалення рішень при атаці. Така схема забезпечувала одночасне ураження декількох цілей, навіть якщо частина безпілотників виходила з ладу в ході шляху [4].

Кооперативна радіоелектронна боротьба (REM) - ще один перспективний напрям: рій може розосереджуватися навколо ворожих станцій РЕБ, змінювати формацію для оптимального розосередження перешкод або організувати «мобільні щити» для захисту власних радіолокаційних засобів. Локальні правила взаємодії й адаптивне налаштування частот дозволяють такому рою залишатися ефективним навіть при активному подавленні каналів зв'язку [1].

Рої БПЛА також виконують завдання безперервного супроводу та контрсупротиву в складних військових сценаріях. Зокрема, у місіях ескорту конвоїв або висуванні наземних підрозділів дрони формують рухому «авіаційну завісу» навколо рухомої цілі, забезпечуючи постійний огляд і швидке виявлення ворожих засідок. Завдяки адаптивній перебудові формації за PSO та нейромережевим рішенням, рій може розширити свій фронт у небезпечних секторах і стиснути його в інших, гарантуючи оптимальне покриття та мінімізацію ресурсних витрат [1].

У програмах Project Convergence та інших випробуваннях НАТО рої дронів забезпечували «автоматичну ідентифікацію» потенційних загроз уздовж маршруту руху бронетехніки, передаючи координати в режимі реального часу. Сотні БПЛА, працюючи у децентралізованому режимі, здатні створити безперервний «коридор спостереження» завдовжки до 50 км, оперативно перебудовувати формацію за виявлення нових загроз і відновлювати цілісність мережі навіть за втрати до 20 % одиниць [7].

Ще одним прикладом є координація ударів проти малокаліберних, швидкорухомих цілей - техніки акісний типу «камікадзе». Мультикоптери, спільно відпрацьовуючи алгоритми formation switching, можуть виявити рухомий бронетранспортер, обійти ворожу ППО й нанести послідовні заходи на ураження з різних напрямків, мінімізуючи ризик перехоплення [5]. Такі «swarm strike» операції вимагають надшвидкої колективної адаптації.

приклад практичних застосувань роїв дронів

Таблиця 1. Приклад практичних застосувань роїв дронів

Місія	Формація	Ключові маневри
Колективна розвідка великої зони	Сіткова (гратка)	Паралельні зсуви («strip sweep»), адаптивне розширення/звуження поля покриття
Оточення та стеження за ціллю	Кільцева	Утримання орбіти, повне 360° огороження, динамічна перебудова радіусу та фази кільця
Масований удар	V-подібна або щільне скупчення	Синхронізація сходження в точку удару, паралельні флангові зсуви та конвергентна концентрація сили
Супровід конвою / евакуація	Ромбова або лінійна	Адаптивне ущільнення/розосередження за загрозами, плавна зміна ширини фронту та гнучке формування коридор
Пошук і рятування (SAR)	Спиральна (розширююча/звужуюча)	Концентричний обліт, поступове розширення покриття, перехід до

		зворотної спіралі при виявленні об'єкта
Радіоелектронна боротьба (РЕБ)	Патрулювання вузьких коридорів	Динамічне розосередження для покриття перешкод, збірний clustering під час глушіння сигналів
Патрулювання вузьких коридорів	Колонна	Перехід між широкою лінією та вузькою колоною, формування «авіаційних ескортів» для захисту коридору

1.1.4. Порівняльний аналіз існуючих платформ та їх обмежень

Попри значний теоретичний базис, практична реалізація роєвих технологій на сьогодні представлена обмеженою кількістю експериментальних та військових програм. Аналіз архітектурних рішень провідних проєктів (таких як програми DARPA та комерційні розробки) дозволяє виявити критичні технологічні бар'єри, що залишаються неподоланими, зокрема в контексті автономності в умовах радіоелектронної боротьби.

Більшість існуючих систем орієнтовані на виконання специфічних вузькопрофільних задач у середовищі з відносно стабільним зв'язком та навігацією. У таблиці 1.2 наведено порівняльний аналіз ключових сучасних роєвих платформ за критеріями архітектури управління та стійкості до зовнішніх впливів.

Таблиця 2. Аналіз існуючих платформ та їх обмежень

Назва платформи / Програма	Розробник / Оператор	Тип архітектури та навігації	Ключові можливості	Критичні обмеження (в контексті РЕБ та GPS-denied)
----------------------------	----------------------	------------------------------	--------------------	--

Perdix	MIT / DoD (США)	Децентралізована (колективний мозок). Спирається на GNSS.	Автономне узгодження строю після скидання з авіаносія (F/A-18). Висока масштабованість (100+ агентів).	Висока залежність від GPS для синхронізації. Обмежені обчислювальні ресурси мікродронів унеможливають складну бортову аналітику при втраті зв'язку.
Gremlins (X-61A)	Dynetics / DARPA	Централізовано-гібридна. Повернення на повітряний носій (C-130).	Багаторазове використання, високе корисне навантаження, складні маневри зближення для стикування.	Критична вразливість каналу управління під час фази повернення. Складність координації при активному глушінні в зоні стикування.
LOCUST	ONR (США)	Гібридна. Запуск із трубчастих пускових установок.	Швидке розгортання («насичення»), низька вартість одиниці, придушення ППО масовістю.	Жорсткі алгоритми поведінки, слабка адаптивність до динамічних змін тактичної обстановки після запуску.
CODE (Collaborative Operations in Denied Environment)	DARPA	Розподілена. Акцент на автономію при втраті зв'язку.	Здатність групи перерозподіляти цілі при втраті зв'язку з оператором.	Орієнтація переважно на стратегічні БПЛА, а не на тактичні малі рої. Алгоритми злиття

				груп у динаміці недостатньо опрацьовані.
--	--	--	--	--

Аналіз наведених систем свідчить, що, хоча проблема групової координації частково вирішена для сценаріїв із доступним сигналом супутникової навігації (GNSS), поведінка роїв в умовах жорсткої протидії (GPS-denied, spoofing, jamming) залишається слабким місцем.

Зокрема, системи типу **Perdix** демонструють ефективність лише за умови точної глобальної синхронізації, яка неможлива під дією потужних засобів РЕБ . Програми на кшталт **CODE** роблять крок у бік автономності, проте їхні алгоритми часто вимагають значних обчислювальних потужностей, недоступних для легких тактичних дронів.

Таким чином, існує невирішене науково-технічне протиріччя між необхідністю забезпечення високої маневреності та живучості тактичних роїв БПЛА в умовах РЕБ та відсутністю алгоритмічного забезпечення, яке б дозволяло здійснювати адаптивну перебудову формації та злиття груп без покладання на глобальні навігаційні системи або постійний канал зв'язку з центром. Саме на вирішення цієї проблеми спрямоване дане дисертаційне дослідження.

1.2 Основні типи формації дронів

У ройових системах БПЛА формація визначає просторове розташування агентів і напрями їх руху з урахуванням завдань місії та навколишніх умов. Статичні формації характеризуються фіксованими геометричними патернами, що забезпечують оптимальний розподіл літальних апаратів у просторі для підвищення аеродинамічної ефективності, покращення поля огляду сенсорів та спрощення алгоритмів координації. Серед найбільш розповсюджених

конфігурацій є лінійна, коли всі дрони йдуть уздовж однієї прямої; клиновидна (V-подібна), що дозволяє кожному наступному апарату використовувати підйомну силу від попередника; ромбоподібна, яка поєднує переваги обох згаданих; а також сіткова або квадратна, що застосовується для рівномірного покриття території під час картографування і моніторингу та розвідки.

Вибір конфігурації рою БПЛА завжди є компромісом між простотою реалізації, ефективністю виконання базових місій і здатністю адаптуватися до змін зовнішніх умов. Статичні формації (лінійна, багатокутна, клиновидна, сіткова) забезпечують високу передбачуваність поведінки агентів і спрощують алгоритми синхронізації: глобальна геометрія фіксується заздалегідь, що дозволяє мінімізувати обчислювальні затрати та обсяг обміну повідомленнями між дронами. У таких схемах легко гарантувати рівномірне покриття території та оптимізувати використання сенсорних ресурсів, зокрема при картографуванні чи інфраструктурному моніторингу.

Однак тотальна жорсткість статичних формацій обмежує їхню придатність у динамічних середовищах. Будь-яка поява перешкоди чи втрата одного з агентів призводить до розриву топології та необхідності повного перепланування, що не завжди можливо в реальному часі. Крім того, статичні патерни погано справляються з непередбачуваними змінами завдання або підвищеною динамікою цілей, оскільки кожна зміна вимагає централізованого втручання чи запуску складних процедур переключення конфігурацій.

Динамічні формації (лінійні зсуви, паралельні зміщення, кільцевий рух, спіральні траєкторії) надають гнучкість, дозволяючи рою підтримувати внутрішню топологію під час руху уздовж траєкторії чи патрулювання периметра. Використання локальних алгоритмів *formation switching* гарантує збереження базової формації з мінімальними втручаннями: кожен агент коригує своє положення за допомогою консенсус-протоколів, аби утримувати бажані інтервали та кути розгортки, навіть коли виявляються перешкоди або зникають сусіди.

Такий підхід підвищує живучість рою в зміненому середовищі та зменшує потребу в централізованому плануванні, однак породжує нові виклики. Зростає складність комунікаційних протоколів, оскільки кожен дрон повинен оперативно обмінюватися траєкторними прогнозами із сусідами. Це призводить до підвищеного навантаження на канали зв'язку й збільшеної затримки прийняття рішень у вузьких або динамічних просторах, де рій має виконувати агресивні маневри для ухилення від несподіваних об'єктів.

Адаптивні формації поєднують механізми динамічних графів та покращених PSO-алгоритмів для забезпечення безперервної реконфігурації структури рою в реальному часі. Замість статичних або параметрично керованих топологій, в адаптивних підходах кожний дрон використовує локальні дані про якість зв'язку та розташування сусідів для оновлення власної підграфової сітки спілкування. Консенсус-протоколи зважують ваги ребер у матриці суміжності залежно від сигналу зв'язку, а змінні коефіцієнти, запозичені з Fractional-Order Velocity-Pausing PSO (FO-VPPSO), дозволяють оперативно регулювати швидкість збіжності під час перерозподілу формації.

Динамічні та адаптивні формації передбачають зміну структури групи під час польоту залежно від зміни обстановки: кількості доступних апаратів, виявлених перешкод, потреб у перерозподілі ролей чи ресурсів. У таких сценаріях система може переходити від однієї фіксованої конфігурації до іншої або здійснювати плавну реконфігурацію на основі локальних алгоритмів поведінки, що імітують моделі пташиних зграй. Зокрема, методи, запозичені з поведінки голубів, дозволяють рою самостійно вирішувати, коли і як розширити, стиснути або змінити формацію для уникнення зіткнень та підтримання зв'язності мережі управління.

Загалом класифікація формацій включає три групи: фіксовані (static), параметрично керовані (плаваючі) та самоадаптивні. Перші застосовуються для завдань із чітким маршрутом і відомим середовищем, другі - коли потребується

мінняти розміри чи кути розгортки під час польоту, а треті - у високодинамічних умовах із непередбачуваними перешкодами або втратами агентів. Таке розділення допомагає вибрати оптимальний підхід до керування роєм і виставити вимоги до модифікованих алгоритмів Particle Swarm Optimization, спрямованих на динамічну перебудову й адаптацію формації в реальному часі.

1.2.1. Статичні формації (лінійна, багатокутна)

Лінійна формація є однією з найпростіших і найпоширеніших конфігурацій у роях БПЛА, коли всі апарати вирівнюються уздовж однієї прямої. Завдяки цьому кожен дрон пов'язаний тільки з двома сусідніми (попереднім і наступним), що суттєво спрощує алгоритми узгодження та знижує обсяг обміну інформацією.

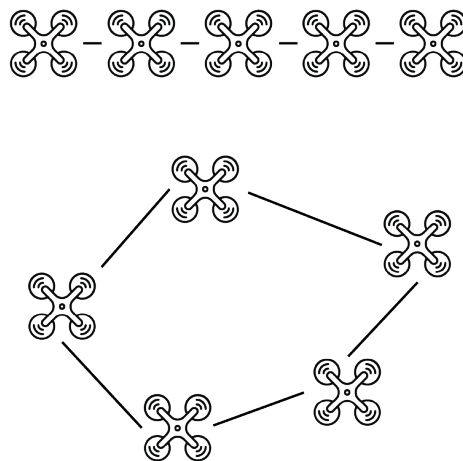


Рис. 3. Приклад побудови лінійної та багатокутних формацій

У бойових і розвідувальних місіях лінійна формація часто використовується для:

- **патрулювання довгих коридорів** (доріжок, ущелин), де важливо швидко охопити вузьку смугу простору;
- **протидії лінійним загрозам** (наприклад, вогневим засобам противника), оскільки такий строй дозволяє координовано просуватися вздовж потенційної смуги ураження, балансуючи ризики втрат;

- **запуску ударних груп «камікадзе»**, коли потрібно зосередити флотилію дронів у лінійний стрій перед одночасним рухом на ціль, забезпечуючи мінімальну розбіжність траєкторій.

Основне правило підтримки лінійної формації можна описати як

$$\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i+1}\| = d_0,$$

Де x_i - позиція i -го дрона, а d_0 - задана міжагентна відстань. Використання цього стало базою для алгоритмів синхронізації фаз руху, які забезпечують збіжність паралельного переміщення (phase synchronization) навіть за наявності місцевих затримок у зв'язку [1].

Участь у розвідувальних операціях лінійна формація дозволяє організувати високошвидкісне сканування вузьких лінійних ділянок (наприклад, трас руху техніки), підтримуючи постійний обмін даними між сусідами для миттєвого реагування на виявлені загрози [2].

Під поняттям **багатокутної формації** розуміють розміщення дронів по вершинах правильної або нерівноправної фігури (трикутника, п'ятикутника, шестикутника тощо) з центральним узгодженням. Кожний агент займає фіксовану кутову позицію відносно центру формації, що дозволяє рівномірно розподілити зусилля спостереження або вогню на всю зону, охоплену фігурою.

У розвідувальних місіях багатокутні формації застосовують для контурного патрулювання периметра цінного об'єкта - наприклад, складу боєприпасів або командного пункту. Кожний дрон відповідає за сектор між суміжними вершинами багатокутника, а його маршрут замикається по лініях фігури, забезпечуючи рівномірне сканування контуру.

У бойових сценаріях таку формацію використовують, коли рою потрібно оточити невелику групу ворожих підрозділів або огородити район ураження. Завдяки симетричній багатокутній побудові дрони можуть координовано

концентрувати вогонь або електронні перешкоди на внутрішню зону без «сліпих» кутів.

Математично підтримка багатокутної формації задається умовою

$$\angle(\mathbf{x}_i - \mathbf{c}, \mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{c}) = \frac{2\pi}{N},$$

Де \mathbf{c} - центр фігури, N - число вершини (дронів), а x_i позначає позицію i -го дрона. Локальні алгоритми узгодження коригують відхилення від рівномірного кута та відстані до центру.

Клиноподібна (V-подібна) формація наслідує поведінку мігруючих птахів, де кожен дрон за винятком «лідера» розташовується трохи позаду та збоку від попереднього апарата. Це створює зони зменшеного аеродинамічного опору за рахунок ефекту *upwash*, що важливо для енергоефективного тривалого польоту великих роїв [1].

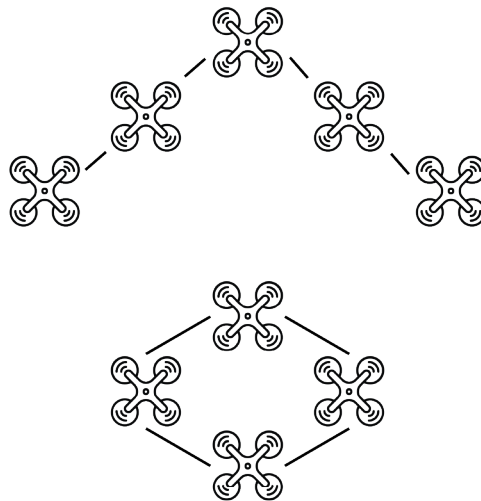


Рис. 4. Приклад побудови клиноподібних формацій

У бойових та розвідувальних умовах V-формація застосовується для:

- **довготривалих маршів** над відкритою місцевістю, коли потрібно економити енергію;
- **оглядових операцій** з фокусом на центральну лінійну вісь, де «лідер» направляє рій до цікавих об'єктів;
- **невеликих конвоїв дронів-камікадзе**, які долають великі відстані перед ударом, зберігаючи сталу відстань і напрями руху.

Ромбова формація становить варіант V-подібної, коли дронів розставлено у дві дзеркальні клиноподібні лінії, що перетинаються під гострим кутом. Така конфігурація забезпечує ширше поле огляду порівняно з простим клином і краще покриття бокових секторів, водночас зберігаючи енергетичні переваги upwash-підтримки.

Точність утримання ромба визначається контрольними алгоритмами, що підтримують постійні відстані до чотирьох сусідів:

$$\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i\pm 1}\| = d_{\text{боков}}; \quad \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i\pm 2}\| = d_{\text{поперечн}},$$

Де $d_{\text{боков}}$ і $d_{\text{поперечн}}$ - відповідні інтервали, задані залежно від розміру рою та типу місії.

Сіткова формація, або квадратно-решітковий розподіл, передбачає розміщення дронів у двовимірному регулярному масиві: усі апарати вирівнюються за рядами та стовпцями з фіксованими відстанями. Такий шаблон широко застосовується під час розвідувальних та картографічних місій, коли необхідно забезпечити максимально рівномірне покриття площі без «прогалин» у зоні спостереження.

У бойових операціях сітка дозволяє сканувати простір перед наступом наземних підрозділів або авіаційних вогневих засобів з виходом на ціль із кількох напрямків одночасно. Кожний дрон фокусується на своєму квадранті

карти, а завдяки коротким «рядкам» комунікації між сусідами забезпечується оперативний обмін інформацією про виявлені перешкоди чи цілі.

Формально підтримка сітки з розміром кроку d реалізується за допомогою двох взаємозв'язків для i -го дрона: по горизонталі

$$\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i_{\text{right}}}\| = d,$$

і по вертикалі

$$\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i_{\text{down}}}\| = d.$$

Алгоритми синхронізації координат контролюють відхилення від цих відстаней та коригують поле повідомлень відповідно до якості зв'язку та локального стану каналів. У поєднанні з PSO-підходами це забезпечує високий рівень жорсткої точності розміщення, необхідної для створення «адаптивних гексагональних сіток» у складних ландшафтах.

Таким чином, статичні формації відіграють ключову роль у сценаріях, де середовище є передбачуваним і важлива максимальна чіткість покриття або низька комунікаційна затримка, що характерно для початкових фаз розвідки і підготовки удару.

1.2.2. Динамічні формації (лінійні/паралельні зсуви, круговий рух)

Динамічні формації відрізняються від статичних тим, що геометрія розгортки рою змінюється «на льоту» відповідно до поставлених завдань або особливостей середовища. Зокрема, рій може виконувати лінійні/паралельні зсуви, коли початковий статичний шаблон (лінія, клин тощо) рушає вздовж обраної траєкторії із збереженням внутрішніх інтервалів між апаратами.

У такій паралельній формації кожен дрон коригує свою позицію за правилом:

$$\mathbf{x}_i(t + \Delta t) = \mathbf{x}_i(t) + \Delta \mathbf{d} - K \sum_{j \in N_i} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)),$$

Де Δd - вектор глобального зсуву, K - коефіцієнт «жорсткості» утримання відстаней, а N_i - множина сусідів для усунення локальних розбіжностей. Така модель дозволяє рою переміщатися, підтримуючи задані відстані між апаратами та оперативно коригуючись під впливом виявлених перешкод або змін чисельності агентів.

Другий поширений тип - **кільцевий рух**, коли дрони рухаються по замкненому контурному маршруту навколо центру інтересу (статичної цілі або рухомої точки).

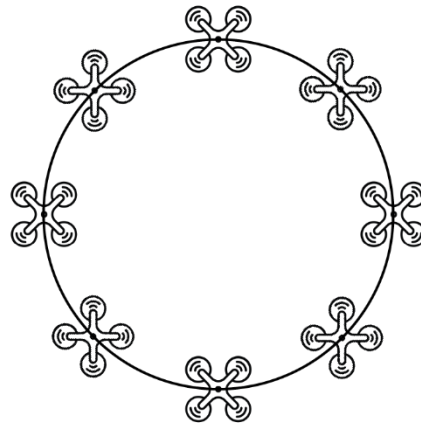


Рис. 5. Приклад побудови кільцевої формації

Кожен дрон підтримує дві складові контролю:

Радіальну - утримання постійного радіуса r від центру:

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + k_r (r_{\text{ціль}} - r_i(t)) ;$$

Кутову - синхронізацію фаз:

$$\dot{\theta}_i = \omega - k_\theta \sum_{j \in N_i} (\theta_i - \theta_j - \frac{2\pi}{N}) ,$$

Де N - загальна кількість агентів, ω - базова кутова швидкість, а k_r, k_θ - коефіцієнти керування [6].

У бойових діях кільцевий рух дозволяє одночасно охопити ціль з усіх боків, ускладнюючи противнику завдання ППО чи захисту. У розвідці кільцева формація ефективна для контурного патрулювання периметра об'єкта та тривалого стеження за рухомими цілями з мінімальною сліпою зоною.

1.2.3 Адаптивні формації

Адаптивні формації - це такі конфігурації рою, які здатні автономно змінювати свою топологію залежно від зовнішніх умов: появи нових перешкод, зміни числа доступних агентів або зміни пріоритетів місії. На відміну від статичних шаблонів та плавних динамічних зсувів, адаптивні система застосовують умовні переходи між різними формаціями або навіть перенавчання (reconfiguration) «на льоту» для збереження цілей групи при жорстких обмеженнях середовища.

В основі адаптивних підходів лежать техніки самоорганізації, які поєднують алгоритми ройового інтелекту (наприклад, PSO) із методами штучного інтелекту (глибинним навчанням чи спайковими мережами). Це дозволяє дронам приймати рішення не лише за локальними правилами, але й з урахуванням поточного контексту операції - як-от якість зв'язку, рівень загрози чи стан заряду батареї [8].

У військових та розвідувальних місіях адаптивні формації є критично важливими, коли:

- раптово з'являються статичні чи рухомі перешкоди, що потребують швидкого обходу;
- частина рою уражена або виведена з ладу, і необхідно **самореорганізуватися**, щоб зберегти покриття або форму атаки;

- зміна тактичної ситуації (наприклад, перехід від розвідки до удару) вимагає **переключення** з відкритих формацій у концентровані та навпаки.

Виділяють три основні класи адаптивних формацій за підходом до організації самоорганізації рою:

1. **Віртуальна структура** (Virtual Structure)

У цьому підході рій розглядається як єдина «жорстка» структура: кожен дрон отримує заздалегідь визначену цільову позицію в єдиній координатній системі віртуального тіла. Якщо необхідна перебудова, контролер (централізований або розподілений) обчислює нові глобальні перетворення структури й розсилає кожному агенту його оновлену мету. Така схема дає найвищу точність формації, але вимагає значних обчислювальних ресурсів для глобальних матричних операцій та централізованого обміну даними.

2. **Поведінковий підхід** (Behavior-Based)

Кожен агент керується набором простих правил локальної поведінки, зокрема притягання до центру, вирівнювання швидкостей та утримання безпечної дистанції, подібно до моделі Боїда. Адаптація відбувається завдяки зміні ваг або порогових значень цих правил залежно від локальної оцінки середовища (перешкоди, кількість сусідів, стан акумуляторів). Цей підхід легше масштабувати та комбінувати, але складніше гарантувати суворе збереження заданого шаблону формації

3. **Граф-теоретичний / консенсусний підхід** (Graph-Based / Consensus)

Топологія рою подається динамічним графом $G(t)$ із ваговою матрицею суміжності $A(t)$, де ребро $a_{ij}(t)$ відображає силу зв'язку між агентами i та j . Агенти синхронізують свої позиції за законами консенсусу:

$$\dot{x}_i = -\sum_j a_{ij}(t)(x_i - x_j)$$

Зміни у середовищі або втрати агентів миттєво оновлюють $A(t)$, а локальні протоколи консенсусу гарантують збіжність до нової формації. Цей підхід поєднує відмовостійкість децентралізації з математичною теорією графів і забезпечує формальне доведення стабільності та швидкості відновлення топології за втрат до 30 % агентів

1.2.4. Порівняльний аналіз переваг і недоліків кожного типу

Для вибору оптимального шаблону рою БПЛА в бойових та розвідувальних операціях необхідно зіставити такі ключові характеристики формацій: стабільність утримання геометрії, час реакції на зміни обстановки, комунікаційне навантаження, енергетичну ефективність, відмовостійкість і тактичну гнучкість.

Статичні формації (лінійні, V-подібні, сіткові, багатокутні) демонструють найвищу жорсткість шаблону: агенти підтримують фіксовані відстані та кути, що забезпечує передбачувану поведінку й мінімізує коливання елементів угруповання [1]. Подібна стабільність супроводжується низьким комунікаційним навантаженням – дрони обмінюються лише повідомленнями про локальні відхилення. Енергетично найвигіднішими є V-клин та ромбові схеми, де використовується upwash-ефект, що знижує загальний опір польоту до $\approx 30\%$ порівняно з індивідуальним дроном [1]. Водночас статичні шаблони мають суттєвий недолік у часі реакції: перехід до нової конфігурації вимагає централізованої чи багатоетапної перебудови, що може три ти десятки-сотні секунд [2]. Втрата навіть одного агента призводить до «прогалини» в формації й потребує зовнішнього втручання, а тактична гнучкість обмежена стабільністю шаблону.

Незважаючи на простоту реалізації та енергетичну ефективність, статичні формації (лінійна, багатокутна, гратчаста) демонструють критичне зниження надійності в умовах щільної міської забудови або гірської місцевості, відомих у літературі як "urban canyons". Головною проблемою стає виникнення зон комунікаційної тіні (Non-Line-of-Sight, NLOS), коли пряма видимість між агентами перекривається перешкодами.

У таких умовах жорстка геометрія рою, що не враховує карту поширення радіосигналу, призводить до фрагментації мережі. Наприклад, при входженні лінійної формації в зону перехрестя будівель, крайні агенти можуть втратити зв'язок із центром, якщо кут дифракції радіосигналу перевищує критичне значення для використовуваної частоти (зазвичай 2.4 ГГц або 5.8 ГГц).

Аналіз поширення сигналу показує, що для збереження зв'язності графа $G(t)$ у статичній формації необхідно, щоб відстань між агентами d_{ij} задовольняла умову:

$$d_{ij} < \frac{c}{f} \cdot \sqrt{\frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{P_{th} L_{path}}}$$

Де P_{TX} - потужність передавача, L_{path} - втрати на трасі (Path Loss), які в умовах міської забудови зростають експоненційно через багатопроменеве поширення.

Для статичних формацій це рівняння накладає жорсткі обмеження на максимальний радіус дії, що часто робить неможливим охоплення великих зон розвідки без ризику втрати керування. Це підтверджує необхідність переходу до адаптивних формацій, здатних змінювати свою геометрію не лише за критерієм аеродинаміки, а й з метою оптимізації метрики RSSI (Received Signal Strength Indicator) між сусідами.

Динамічні формації (паралельні зсуви, кільцевий рух, спіральні траєкторії) забезпечують значно швидшу реакцію – до кількох секунд – на

появу перешкод чи втрату агентів, адже корекція відбувається локальними консенсус-протоколами [2]. Проте за рахунок постійних коригувальних маневрів жорсткість шаблону знижується, а комунікаційне навантаження зростає через необхідність обміну траєкторними прогнозами та станом сусідів. Енергетична ефективність теж падає порівняно зі статичними: часті маневри й корекції швидкості збільшують витрати енергії, хоча ефект upwash у V-подібних зсувних схемах частково компенсує ці витрати. Динамічні формації мають середню відмовостійкість - вони здатні заповнювати прогалини після втрати до 10–20 % агентів без централізації, але лише за стабільної зв'язності між сусідами. Тактична гнучкість таких схематів високіша, ніж у статичних, оскільки вони дозволяють безперервно маневрувати та обходити загрози в процесі виконання місії.

Адаптивні формації поєднують найкраще з двох підходів: вони підтримують жорсткість при відсутності змін, швидко реагують на нові перешкоди та втрати агентів (час реакції – 1–2 с) завдяки поєднанню локальних PSO-алгоритмів і нейромережевого ухвалення рішень [8]. Цей клас схематів має найвищі комунікаційні витрати – дрони передають не лише стан позицій і швидкостей, але й метрики якості зв'язку, рівня заряду та локальні оцінки перешкод. Водночас відмовостійкість максимальна: система здатна відновити формацію після втрати до 30 % одиниць без залучення центрального контролера. Тактична гнучкість адаптивних підходів є безпрецедентною – вони безшовно переключаються між режимами розвідки, удару та РЕБ, автоматично обираючи найдоцільніший шаблон для кожної фази місії. Енергетичні затрати варіюються залежно від частоти перебудов, проте інтелектуальні алгоритми балансування метрик дозволяють оптимізувати роботу рою за заданими пріоритетами: мінімізація часу реагування або економія заряду акумуляторів.

Статичні формації є оптимальними для передбачуваних початкових фаз місій із низькою динамікою умов. Динамічні - краще підходять для зон з рухомими перешкодами чи маневрених дій. Адаптивні формації

рекомендуються для комплексних бойових та розвідувальних операцій, де висока автономність, швидкість реакції та відмовостійкість мають вирішальне значення.

1.3. Завдання, які виконують рої дронів

1.3.1 Структурний аналіз завдань рою БПЛА та відповідний вибір формацій

У ройових системах БПЛА ключовими напрямками діяльності є спільне планування траєкторій, розподіл завдань між агентами, керування формаціями, оптимізація ресурсів і зв'язку, а також уникнення зіткнень. Координоване планування траєкторії забезпечує ефективне та безпечне переміщення групи в динамічному середовищі, спираючись на алгоритми рійового інтелекту й комбінаторної оптимізації, що дозволяє адаптувати маршрути «на льоту» та враховувати обмеження кожного апарата. Розподіл завдань передбачає декомпозицію місії на підзадачі та призначення їх окремим дронам із урахуванням їхніх можливостей, місцеположення й часу виконання. Керування формаціями гарантує підтримання заданих топологічних шаблонів і миттєву реконфігурацію просторового розгортання у разі появи перешкод чи втрат агентів, тоді як оптимізація мережі зв'язку підвищує відмовостійкість системи при зростанні чисельності рою, мінімізуючи ризик «мертвих зон» у комунікації.

У бойових і розвідувальних операціях рій БПЛА зазвичай виконує низку взаємопов'язаних фаз, кожна з яких ставить власні ключові завдання. Нижче подано їхню класифікацію разом із прикладами формацій та технічними особливостями реалізації.

Під час початкової фази **розвідки й картографування** рій прагне максимально рівномірно охопити досліджувану територію, збираючи аерофотознімки, дані LiDAR та радіоелектронну інформацію. Для цього система зазвичай переходить у сіткову або спіральну формацію, яка дозволяє водночас виконувати багато точкових вимірів і створювати 3D-моделі місцевості. Розподіл маршрутів між дронами здійснюється за допомогою

розподіленого PSO, що мінімізує перекриття зон спостереження й одночасно забезпечує зв'язність ad hoc-мережі. Кожен агент оцінює інформаційну корисність своїх поточних координат та передає ці дані сусідам, завдяки чому вузол прийняття рішення отримує колективне уявлення про карту завдання [1]. Збереження мережевої зв'язності гарантується через консенсус-протоколи, які підтримують зв'язність графа дронів навіть за умов радіоперешкод та часткової втрати каналів [2].

У фазі **координації ударних місій** рій переходить у більш компактну формацію - зазвичай V-подібну чи лінійну - щоб зосередити вогонь або створити масований залп. Розподіл підзадач (task allocation) здійснюється гібридним підходом PSO із поведінковими правилами: локальні рішення агентів коригуються глобальними сигналами від лідера чи наземної станції, що мінімізує затримки та підвищує вірогідність ураження цілей [3]. Маршрутизація кожного дрона враховує штучні потенційні поля для уникнення зіткнень і одночасно оптимізує шлях до цілі за критерієм мінімального загального часу польоту [5].

При переході до **радіоелектронної боротьби** рій розгортається в mesh-мережу, де дрони розосереджуються для рівномірного покриття спектра противника. Кожен агент адаптує ваги власної антенної решітки за допомогою локального PSO, фокусуючи глушіння на ворожих станціях і підтримуючи децентралізоване перемикання каналів у разі глушіння супротивника [4].

Нарешті, у фазі **виходу та евакуації** рій може перейти в колонну або ромбову формацію для супроводу вузьких проходів чи конвоїв. Шляхи евакуації оновлюються в реальному часі через PSO- або ACO-алгоритми перезапуску, які виявляють нові загрози та генерують безпечні обходи. Обидва контури - стабілізації автопілота та формаційного керування - реалізуються на борту кожного дрона через поєднання PID/Model Predictive Control, що забезпечує плавну перебудову без ривків у польоті [7].

Таким чином, кожне завдання вимагає відповідної формації, а утримання та динамічна зміна шаблону забезпечуються поєднанням методів PSO, консенсус-протоколів, поведінкових правил і потенційних полів разом із сучасними сенсорними й мережевими рішеннями.

1.3.2. Взаємодія дронів у рою

Узгоджене виконання розвідувальних та бойових підзадач рою БПЛА вимагає інтеграції низки апаратних і програмних компонентів: сенсорних комплексів для просторового позиціонування, мережкових протоколів для обміну даними та алгоритмів маршрутизації і контролю формації.

Взаємодія між агентами є фундаментальною складовою роботи рою БПЛА: тільки через скоординований обмін даними та спільне ухвалення рішень система набуває властивостей самоорганізації, відмовостійкості та масштабованості. З технічної точки зору взаємодія охоплює кілька ключових компонентів: протоколи комунікації, структуру мережі, формати повідомлень та алгоритми їх обробки.

Таблиця 3. Види комунікації в середині рою дронів

Компонент	Призначення	Приклади реалізації
GPS/INS	Глобальне та інерційне позиціонування, стійкість до втрат GPS	RTK-GPS + IMU для комбінованої навігації [23]
LiDAR / камери	Створення детальних карт, локальне	Модуль Velodyne Puck +

	відносне позиціонування	стереокамери для SLAM
Ультразвук / UWB	Короткодіапазонне позиціонування в GPS-denied середовищі	UWB-маячки для відстаней до 100 м з точністю 10 см
Wi-Fi / Mesh / 5G	Швидкий обмін команд та стану, низька затримка зв'язку	Ad hoc-мережі на базі IEEE 802.11s; 5G NR для критичної зв'язності

Протоколи комунікації та топологія мережі. Рій зазвичай працює у **розподіленій ad-hoc мережі**, де кожен дрон підтримує зв'язок із фіксованим числом найближчих сусідів (degree-based adjacency). Це забезпечує баланс між надійністю зв'язку та обсягом обміну даними. Прикладом є консенсус-протокол, у якому кожен агент періодично обмінюється поточними станами (позиція, швидкість) із N_i сусідами і обчислює власне нове значення як середнє з отриманих даних та свого попереднього стану.

Інформація, яку передають між агентами, діляться на чотири категорії:

Таблиця 4. Класифікація видів сигналів

Категорія	Зміст	Частота	Приблизний обсяг (байт/сек)
Тактова синхронізація	Часовий штамп, порядковий	10 Гц	100

	індекс ітерації алгоритму		
Стан позиції та швидкості	x_i, v_i	5–10 Гц	200
Алерти та події	Виявлення цілі, ураження сусіда, перешкода	подієво	50
Управлінські команди	Нові параметри формації, сигнал лідера	1–2 Гц	150

Така класифікація дозволяє ранжувати пріоритети у черзі передачі: критична тактова синхронізація та алерти проходять насамперед, тоді як великі повідомлення з повними картами передаються рідше або через наземні вузли.

Алгоритмічні шаблони обміну. Найпоширенішим є push–pull механізм: кожен агент надсилає дані сусідам (push) і в той же час запитує від них актуальні стани (pull). За допомогою такого подвійного обміну вдається досягти швидкого консенсусу й уникнути «мертвих зон», коли один із дронів може залишитися із застарілою інформацією.

Управління довірою та безпекою. У бойових умовах рій БПЛА піддається різноманітним загрозам: спуфінгу GPS-сигналів, радіозаглушенню (jamming) та підробці (spoofing) команд від центрального контролера чи «сусідів». Щоби забезпечити достовірність і цілісність даних, необхідно

застосовувати криптографічні механізми, протоколи аутентифікації та розподіл ключів із гарантіями стійкості до внутрішніх збурень. По-перше, кожне повідомлення між дронами підписується еліптичнокривими цифровими підписами (ЕСС), що забезпечують короткі ключі та високу криптографічну стійкість. Обмін відкритими ключами відбувається на початку місії через безпечний канал (наприклад, за допомогою QKD-лінку або попередньо завантажених сертифікатів). Кожен агент перевіряє підпис сусіда до обробки даних; неуспішна верифікація призводить до ізоляції вузла і формування адаптивного графа зв'язків без шкідливого агента. По-друге, для захисту від зловмисних-атак (коли зловмисник видає себе за одного з дронів і надсилає шкідливі чи неконсистентні стани) використовують розподілені алгоритми толерантності до збоїв. Замість простого усереднення станів, кожен дрон відкидає крайні значення з набору повідомлень від сусідів і обчислює стан за секвенційною агрегатною функцією (Byzantine-resilient aggregation). Це дає змогу зберегти коректність консенсусу навіть за наявності до двох-трьох шкідливих учасників у графі зв'язків. По-третє, систему безпеки доповнюють механізмами виявлення аномалій, які аналізують статистику пакетів (частота, розмір, затримки) і моделюють нормальну поведінку рою за допомогою легковагих машин навчання (наприклад, one-class SVM на борту). В разі виявлення аномалії (радіоперешкоди, сплески повідомлень або надто часті звернення до лідера) запускається процедури перевірки сусідів і, за необхідності, зміни топології зв'язків.

Синхронізація обчислень і затримки

Реальність бойових мереж характеризується нестабільними затримками та перервами зв'язку. Для коректної роботи алгоритмів консенсусу та PSO-оновлень необхідно узгоджувати різні часові шкали та компенсувати асинхронність повідомлень.

1. Кожне повідомлення маркується логічним часовим штампом (Lamport timestamp), що дозволяє кожному дрону відновити порядок подій без

потреби у глобальному годиннику. Це гарантує коректність побудови консенсусу навіть за випадкової перестановності пакетів.

2. Для відтворення реального часу використовують легковагий протокол Precision Time Protocol (PTP) у версії для ресурс-обмежених систем. Кожен дрон періодично синхронізує годинник із сусідом, що виконує роль часової опори (grandmaster), за схемою “request–response”. Виміряні затримки та дисперсія компенсуються корекціями локального годинника, що забезпечує похибку не більше одного–двох мілісекунд за типових умов мережі.
3. У алгоритмах формування формації застосовують фільтри Калмана для апроксимації поточного стану сусідів між оновленнями. На основі останнього відомого виміру та моделі руху Калманов спостерігач обчислює очікувані координати агента на час обробки наступного кроку, що дозволяє підтримувати плавність руху та уникати «ривків» навіть за втрат пакетів або затримок у каналі.

Донесення команд автопілоту гарантує безпечну реалізацію маневрів з урахуванням кінематичних обмежень БПЛА. Умови мережевої взаємодії контролюються Quality of Service (QoS) параметрами, щоб забезпечити необхідну затримку та пропускну здатність у бойових умовах активного подавлення радіоканалів.

1.4 Перспективи використання роїв БПЛА у бойових і розвідувальних сценаріях

Рої БПЛА демонструють високу гнучкість і потужність у виконанні складних місій, поєднуючи можливості одночасного спостереження, маневрування та оперативного реагування. Основні напрями перспективного розвитку включають:

1. інтеграцію з високоавтоматизованими системами C2 для забезпечення швидкого обміну розвідувальними даними та координації в реальному часі;
2. розгортання в GPS-denied та кіберзагрозливих середовищах із використанням відносних методів навігації;
3. застосування роїв як мультифункціональних платформ, що поєднують розвідку, удар та РЕБ у єдиній системі;
4. розвиток автономних алгоритмів на базі гібридних PSO та нейромережових модулів для адаптивного керування у надскладних тактичних умовах.

1.4.1 Сценарії високої складності та GPS-denied середовище

У сучасних зонах бойових дій та при виконанні прихованих розвідувальних операцій супротивник дедалі активніше застосовує засоби радіоперешкодження (jamming) і кіберзагрози з метою позбавити дрони доступу до GNSS-сигналів. У таких умовах рої БПЛА переходять на відносну навігацію, поєднуючи дані стереокамер, LiDAR та IMU, що дозволяє підтримувати точність позиціонування навіть без GPS-підтримки [5].

Підтримка зв'язності мережі досягається через mesh-архітектуру ad-hoc мереж із впровадженням консенсус-протоколів, які автоматично відновлюють маршрути передачі даних у разі вибуття вузлів або активного глушіння каналів [2]. Крім того, застосування локальних фільтрів стану (наприклад, розширеного фільтра Калмана) компенсує затримки й втрати пакетів, що забезпечує безперервність елементів керування формацією навіть за нестабільного зв'язку [7].

Розвиток комбінованих систем навігації на базі зорових SLAM-алгоритмів і радіочастотного локатору дозволяє рою адаптуватися до критично складних міських та лісистих ландшафтів, де GPS-сигнал природно слабшає. Використання таких підходів продемонстровано в роботі Dixit et al., де група

мультикоптерів успішно утримувала формацію та оминала перешкоди виключно на основі зорових та лазерних вимірювань [5].

Таким чином, комбінація відносної навігації, mesh-мереж та алгоритмів стійкого консенсусу створює надійну платформу для виконання критично важливих місій у GPS-denied і ворожому радіочастотному середовищі.

1.4.2 Рої як мультифункціональні платформи - поєднання розвідки, удару та радіоелектронної боротьби

В сучасних бойових умовах вимагається, щоб одна й та ж група БПЛА могла швидко переключатися між завданнями розвідки, високоточних ударів та створення перешкод противнику. Це досягається за рахунок модульної архітектури платформ, де замість фіксованого навантаження кожен дрон оснащується пристосовуваними носіями корисного обладнання (plug-and-play payload bays), що дозволяють змінювати сенсорний та ефектний комплект прямо в польоті або в короткий технічний пауз.

У режимі розвідки рій застосовує комбіноване обладнання: оптичні EO/IR-камери, LiDAR-сканери і бортові радіоелектронні приймачі. Дані з різних сенсорів об'єднуються за допомогою розподіленого алгоритму SLAM та розподіленої PSO-оптимізації траєкторій, що дозволяє забезпечити єдину карту місцевості із високою роздільною здатністю без централізованого агрегаційного вузла [1], [14].

У режимі ударних місій платформи швидко переозброюються бойовими модулями - кумулятивними кумулятивними мінами, дозованими боєприпасами або некерованими реактивними снарядами. Координована атака виконується через динамічне призначення цілей (task allocation) на основі гібридного PSO з behavior-based правилами, що гарантує мінімізацію перетинання курсів і синхронізацію виходу на пусковий рубіж із похибкою не більше 0,5 с для всього рою [6].

Паралельно з цим активується режим радіоелектронної боротьби: кожен дрон у mesh-мережі формує вузол потужного beamforming-масиву та локально коригує шаблон випромінення за допомогою PSO-алгоритму тюнінгу ваг антенних елементів. Це дозволяє концентрувати глушіння на ворожих радіостанціях і миттєво змінювати спектральний фокус у відповідь на переміщення супротивника або появу нових передавачів [3], [4].

Перехід між режимами виконується без висадження дрібних платформ: у ході польоту наземна станція або лідер-дрон посилає коротке повідомлення з інструкцією на зміну ролі, після чого на борту автоматично виконуються попередньо відпрацьовані серії команд для перезброєння й перелаштування сенсорів. Це досягається завдяки уніфікованому інтерфейсу управління payload та механізму гарячої заміни (hot-swap), який забезпечує безперебійну роботу автопілота й формаційного контуру.

Таким чином, мультифункціональні рої забезпечують єдину платформу для виконання всього спектра сучасних операцій - від детальної розвідки до нанесення ударів і проведення РЕБ-заходів - без втрати часу на логістику та перевантаження, що критично підвищує оперативність та живучість угруповання.

1.4.3 Тенденції розвитку: автономія, координація зі штучним інтелектом та мікророї

Однією з ключових тенденцій у розвитку роїв БПЛА є зростання рівня автономності окремих агентів та всього угруповання в цілому. Сучасні дослідження з використання Mean-Field підходів демонструють, що при достатньо великій кількості дронів їхня поведінка може описуватися неперервними щільнісними моделями, що дозволяє уникнути розпаду групи та автоматично підтримувати бажану формацію без централізованого контролера [9].

Одночасно активною залишається інтеграція методів штучного інтелекту для когнітивного управління роєм. Зокрема, нейромережеві архітектури спайкових роїв (RSNN) застосовуються для прийняття рішень про перебудову формацій за допомогою локальних reward-модульованих сигналів, а глобальні PSO-алгоритми синхронізують гіперпараметри мережі у всіх агентів. Така комбінація дозволяє рою швидко адаптуватися до змін умов середовища з мінімальною затримкою та витратами обчислювальних ресурсів [13].

Паралельно розвиваються підходи глибокого підсилювального навчання (Deep RL) для багатокрокових кооперативних завдань. Дрони навчаються взаємодіяти у формі multi-agent систем, оптимізуючи свої політики руху та розподілу ролей з урахуванням довготривалих нагород за виконання колективної мети. Такі алгоритми виявилися ефективними у сценаріях пошуку й рятування, комбінуючи локальний обмін інформацією з механізмами універсальних функцій значущості [16].

Окремим напрямом є поява мікродроїв - ансамблів ультракомпактних БПЛА (міліметрові дрони, мініквадрокоптери), які можуть розгортатися в замкнутих приміщеннях та складних урбаністичних ландшафтах. Їхня мала інерція та висока маневреність дозволяють виконувати завдання контурного обходу й внутрішньої розвідки там, де класичні системи безпілотників безсилі. Масове використання мікродроїв у поєднанні з великими агентами (heterogeneous swarms) створює багаторівневу структуру координації, коли великі дрони виконують роль «сторожових», а мікродрої - глибинну розвідку [10].

Таким чином, майбутнє роїв БПЛА лежить у побудові високорівневих архітектур, що поєднують автономні когнітивні агенти, гібридні PSO+NN керування та мікродрої у єдиному інтегрованому угрупованні. При цьому важливо зберегти баланс між обчислювальною складністю алгоритмів та реальними апаратними обмеженнями платформ.

1.5 Постановка задачі адаптивної зміни формації

Проведений у першому розділі аналіз сучасного стану теорії та практики керування групами безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволив виявити низку критичних обмежень існуючих підходів. Встановлено, що класичні методи керування, які базуються на фіксованих (статичних) формаціях або централізованій архітектурі, демонструють незадовільну ефективність в умовах активної радіоелектронної боротьби (РЕБ) та складного урбаністичного ландшафту («urban canyons»).

Зокрема, існуючі децентралізовані протоколи (MANET, flocking) забезпечують локальну координацію, проте не гарантують збереження глобальної зв'язності мережі керування при значних втратах агентів (до 30%) або швидкій зміні топології.

Таким чином, сформульовано **науково-технічне протиріччя**, яке полягає у невідповідності між: оперативною необхідністю забезпечення надшвидкої адаптивної реконфігурації та злиття роїв (з часом перехідного процесу $T_{recong} < 3c$) для збереження їх живучості в умовах вогневого впливу та РЕБ, а також відсутністю алгоритмічного забезпечення, яке б гарантувало утримання алгебраїчної зв'язності комунікаційного графа ($\lambda_2(L) > 0$) та безперервність виконання місії без наявності єдиного центру керування та сигналів глобальної навігації (GNSS).

Вирішення цього протиріччя потребує розробки нових математичних моделей та методів адаптивного керування.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності та живучості роєвих систем БПЛА в умовах динамічної невизначеності та радіоелектронних завад шляхом розробки методів адаптивної реконфігурації формації та децентралізованого злиття груп.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

1. **Розробити математичну модель адаптивного керування формацією**, яка, на відміну від класичних підходів, поєднує методи ройового інтелекту (модифікований PSO) з потенціальними полями змінної метрики, що дозволить забезпечити плавність траєкторій та мінімізацію енерговитрат при обході перешкод.
2. **Синтезувати алгоритм інкрементального злиття роєвих топологій (Incremental Topology Fusion)**, що забезпечує об'єднання незалежних груп БПЛА в єдину інформаційну мережу без зупинки виконання місії та з гарантованим збереженням зв'язності графа взаємодії.
3. **Розробити метод динамічного розподілу ролей (ALVCS)** на основі асиметричного локального голосування для забезпечення координації в гетерогенних роях без виділеного лідера в умовах нестабільного зв'язку.
4. **Провести експериментальне дослідження** розроблених методів та алгоритмів шляхом імітаційного моделювання, оцінити їхню часову складність, енергоефективність та стійкість до втрат вузлів порівняно з існуючими аналогами.

Об'єктом дослідження є процеси децентралізованого групового керування та інформаційно-комунікаційної взаємодії в ансамблях (роях) безпілотних літальних апаратів, що функціонують в умовах апріорної невизначеності навколишнього середовища, обмеженості бортових енергетичних та обчислювальних ресурсів, а також цілеспрямованого радіоелектронного придушення каналів зв'язку та навігації.

Предметом дослідження є математичні моделі, методи та алгоритми адаптивної просторово-часової синхронізації, реконфігурації формацій та структурного злиття гетерогенних груп БПЛА, зокрема:

- математичні моделі динаміки рою на основі гібридних підходів (модифікована оптимізація ройових частинок PSO та метод штучних потенціальних полів) для забезпечення безколізійного руху;

- методи підтримки алгебраїчної зв'язності комунікаційного графа мережі в умовах стохастичного руйнування каналів передачі даних;
- алгоритми інкрементального злиття топологій (Incremental Topology Fusion) для об'єднання незалежних кластерів БПЛА без зупинки виконання польотного завдання;
- механізми асиметричного локального голосування (ALVCS) для динамічного перерозподілу ролей координації без виділеного глобального лідера.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач у роботі використано:

- теорію графів та матричний аналіз - для опису топології мережі зв'язку, моделювання процесів злиття підграфів та оцінки зв'язності системи через спектральні властивості лапласіана графа;
- методи ройового інтелекту (Swarm Intelligence) та еволюційної оптимізації - для синтезу траєкторій перешикувань, мінімізації часу реконфігурації та енерговитрат;
- теорію автоматичного керування - для забезпечення стійкості контурів утримання формації та консенсусу швидкостей агентів;
- імітаційне моделювання - для верифікації розроблених алгоритмів та оцінки їхньої ефективності в умовах стохастичних збурень.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТА УТРИМАННЯ ФОРМАЦІЇ ДРОНІВ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ В БОЙОВИХ ТА РОЗВІДУВАЛЬНИХ МІСІЯХ

Роеві системи безпілотних літальних апаратів, що функціонують у динамічному середовищі, потребують математичних моделей, здатних адекватно описувати процеси зв'язку, самоорганізації та перебудови мережевої структури. У більшості сучасних підходів для моделювання внутрішньої

комунікації використовуються два принципово різні формалізми: координатно-просторові та графові.

Координатні моделі переважно базуються на визначенні зон покриття кожного вузла (наприклад, через модель кола з радіусом зв'язку r_c) та обчисленні функцій досяжності, що залежить від відстані, перешкод або вірогідності лінку. У таких моделях мережева структура виводиться із розміщення БПЛА в просторі, а якість зв'язку моделюється як функція від евклідової відстані. Однак координатні підходи часто припускають наявність точного глобального позиціонування та не враховують динаміку втрати або відновлення вузлів при порушенні зв'язку.

Натомість у теорії мобільних адгок-мереж (MANET) і роєвих архітектур (FANET) широкого застосування набули графові моделі, у яких рій розглядається як неорієнтований або орієнтований граф $G=(V,E)$ де вузли V відповідають БПЛА, а ребра E - можливим або активним каналам зв'язку. Такий формалізм дозволяє описувати топологію незалежно від координат, фокусуючись на структурній зв'язності, маршрутах передачі, ступені вузлів, діаметрі графа та спектральних характеристиках (зокрема, алгебраїчній зв'язності $\lambda_2(L)$ лапласіану). Зокрема, моделі на основі теорії графів лягли в основу таких підходів як DTRP (Dynamic Topology Reconstruction Protocol), FlockNet, SBP (Swarm Broadcast Protocol) та SwarMer.

Водночас більшість існуючих моделей мають обмеження щодо динамічної перебудови структури рою після фрагментації або під час злиття незалежних груп. Зокрема, стандартні MANET-протоколи не враховують сценаріїв масового приєднання нових компонент, що призводить до тривалих затримок у відновленні маршрутизації. Крім того, в багатьох випадках припускається централізоване керування або наявність стійкого базового вузла, що не відповідає умовам бойового застосування.

Отже, існує потреба у створенні моделей, здатних описувати багатокомпонентні роєві мережі з динамічним складом, відсутністю фіксованих лідерів, високим рівнем мобільності та потенційною фрагментацією. У цьому контексті доцільним є застосування графових моделей з елементами спектральної теорії та локальних протоколів самоорганізації, що дозволяє адекватно формалізувати процеси реконфігурації та злиття роїв у змінному середовищі.

У реальних бойових і розвідувальних операціях рій БПЛА стикається з численними викликами, що роблять попередньо задані, статичні або жорстко жорсткі формації недостатньо ефективними:

1. **Динамічні зміни середовища та задач місії.** При переході від розвідки до ударних операцій або до режиму РЕБ група повинна вміти миттєво змінювати свій просторовий рисунок. Аналіз гібридних PSO-алгоритмів показав, що рішення, здатні адаптуватися на льоту, значно скорочують час перебудови (до 30–50 % у порівнянні з класичною PSO чи DE) та зменшують витрати енергії (на 15–25 %) за рахунок мінімізації зайвих маневрів і швидшої збіжності до нової конфігурації [19].
2. **Вразливість до втрат агентів і радіоперешкод.** У разі враження або виходу з ладу до 30 % дронів, а також при активному глушінні ліній зв'язку, централізовані й лідер–ведені схеми руйнуються. Гібридні PSO+MAS підходи продемонстрували здатність підтримувати цілісність формації навіть за втрати до 30 % учасників без втручання оператора, завдяки динамічному перевибору лідерів та розподіленому консенсусу [20], [23].
3. **Уникнення локальних мінімумів та застрягання.** Чисті методи потенційних полів часто застрягають у локальних мінімумів, а класичні PSO - у слабких локальних оптимумах. Адаптивні гібриди PSO–DE (AHPSODE) і θ -PSO із віртуальною структурою забезпечують вихід із

- таких пасток і знаходять глобально оптимальні рішення з більшою надійністю ($\pm 5\%$ до ідеального результату при 800 ітераціях) [39], [22].
4. **Вимоги до енергоефективності.** Реальні БПЛА обмежені запасом енергії; непотрібні маневри значно скорочують час місії. Згідно з експериментами, гібрид PSO+флорінг знижує сумарний шлях на 12–18 % порівняно з D* Lite, а кластерні PSO-MAS - на 20–22 % у сценаріях злиття формацій, що прямо підвищує тривалість польоту [21], [20].
 5. **Необхідність плавності та стабільності.** Маневри повинні бути плавними, аби не втрачати стабільність автопілота та не створювати ударні навантаження на платформи. Використання PSO в RHC-схемі дозволяє генерувати безперервні траєкторії, що зменшує коливання та «стрибки» координат до рівня $\pm 0,2$ м при перебудові.
 6. **Підвищення автономності.** Чим менше залежність від централізованого зв'язку, тим вищий рівень автономності рою. Поєднання PSO з локальними rule-based або нейромережевими модулями (RSNN) забезпечує можливість прийняття рішень на борту кожного дрона, що було доведено в моделюванні гетерогенних роїв із мікророями [13], [10].

Таким чином, **необхідність розробки адаптивного алгоритму перебудови** формації базується на сукупності тактичних, технічних і енергетичних вимог до сучасних роїв БПЛА. Комбінація гібридних PSO-методів із розподіленими підходами забезпечує швидку, стабільну й енергоефективну перебудову в умовах бойових втрат, радіоперешкод та динамічних змін задач.

2.1 Критерії та метрики вибору формації

Оцінювання ефективності зміни формації рою безпілотних літальних апаратів потребує введення узгодженої системи кількісних метрик, які

відображають як геометричну якість побудови нової конфігурації, так і часові, енергетичні та структурно-топологічні характеристики процесу перебудови. Надалі ці метрики використовуються як критерії при порівнянні різних алгоритмів, а також як складові цільових функцій у задачах синтезу керування, зокрема при розробці алгоритмів злиття роїв у динамічному середовищі.

Розглядається рій із N БПЛА, які у момент часу t мають вектори положення $x_i(t) \in \mathbb{R}^3, i = 1, \dots, N$. Бажана конфігурація формації задається множиною опорних точок $p_i(\theta, t) \in \mathbb{R}^3$ параметризованих вектором параметрів формації θ (масштаб, орієнтація, глобальний зсув тощо). В загальному випадку процес перебудови відбувається на кінцевому інтервалі часу $[0, T]$, де T відповідає завершенню перехідного процесу та досягненню нової стійкої формації.

Однією з базових метрик є час перебудови формації T_{reconf} який визначається як мінімальний момент часу, починаючи з якого відхилення усіх апаратів від відповідних опорних позицій не перевищує заданого порогу ε_{max} . Формально це можна записати у вигляді

$$T_{reconf} = \inf \{t \in [0, T] : \|x_i(\tau) - p_i(\theta, \tau)\| \leq \varepsilon_{max}, \forall i = 1, \dots, N, \forall \tau \in [t, T]\}.$$

Вибір порогу ε_{max} визначається вимогами до точності формації в конкретному бойовому або розвідувальному сценарії (наприклад, радіус допустимого розкиду відносно лінії фронту чи зони спостереження). Час T_{reconf} є критичною характеристикою для задач, де рій повинен швидко адаптуватися до нових умов, зокрема при обході перешкод, маневрах противника або злитті з іншою групою БПЛА.

Другим ключовим показником є середньоквадратичне відхилення положень від опорної формації на заданому інтервалі часу. Для фіксованого моменту часу t миттєве середньоквадратичне відхилення визначається як

$$\varepsilon_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \|x_i(t) - p_i(\theta, t)\|^2}$$

Для інтегральної оцінки якості проходження перехідного процесу доцільно розглядати усереднену по часу величину

$$\bar{\varepsilon}_{rms} = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon_{rms}(t) dt$$

Чим меншим є значення $\bar{\varepsilon}_{rms}$ тим ближче траєкторії реальних апаратів пролягають до опорної формації, що свідчить про високу точність керування та узгодженість поведінки в рої.

Важливою характеристикою є також **енергетична вартість перебудови**, яка пов'язана із сумарними витратами енергії на зміну швидкості й прискорення апаратів у процесі переходу. У спрощеній моделі, що абстрагується від конкретного типу силової установки, можна використовувати квадратичний функціонал швидкостей і прискорень:

$$J_{energy} = \sum_{i=1}^N \int_0^T (\alpha \|v_i(t)\|^2 + \beta \|a_i(t)\|^2) dt$$

Де $v_i(t) = \dot{x}_i(t)$ – вектор швидкості, $a_i(t) = \ddot{x}_i(t)$ – вектор прискорення, а коефіцієнти $\alpha > 0$, $\beta > 0$ визначають відносну вагу внеску швидкості й прискорення у загальні витрати. Збільшення β дозволяє штрафувати різкі зміни прискорень, тим самим забезпечуючи плавність траєкторій, тоді як домінування α робить критичною саме величину швидкостей. Функціонал J_{energy} відображає компроміс між швидкістю перебудови та ресурсом бортових систем енергозабезпечення.

Із J_{energy} природно впливає ще одна тісно пов'язана величина – функціонал гладкості траєкторій:

$$J_{smooth} = \sum_{i=1}^N \int_0^T \|a_i(t)\|^2 dt$$

який є окремим випадком J_{energy} при $\alpha = 0$. Мінімізація J_{smooth} дозволяє забезпечити комфортний, з точки зору динаміки, режим перебудови, зменшуючи пікові навантаження на конструкцію й приводи.

Структурна стійкість рою до втрати окремих апаратів та порушення зв'язку описується через топологічні метрики комунікаційного графа $G(t) = (V(t), E(t))$, де вершини $V(t)$ відповідають БПЛА, а множина ребер $E(t)$ задається на основі наявності каналів зв'язку між ними. Лапласіан такого графа позначається через $L(t)$, а його алгебраїчна зв'язність визначається другою за величиною власною $\lambda_2(L(t))$. Значення $\lambda_2(L(t)) > t$ гарантує зв'язність графа, а величина цієї власної є мірою ступеня зв'язності. Для оцінки робастності використовують, наприклад, показник

$$P_{rob} = P\{\lambda_2(L^{(-k)}) > 0\}$$

де $L^{(-k)}$ – лапласіан графа після випадкової втрати частки $k\%$ вузлів у рої, а P_{rob} характеризує ймовірність збереження зв'язності після таких втрат. Фактично P_{rob} задає структурну надійність роєвої архітектури під час перебудови формації або злиття з іншими групами.

З практичної точки зору доцільно також відстежувати інтегральну характеристику сумарної довжини траєкторій при перебудові:

$$L_{tot} = \sum_{i=1}^N \int_0^T \|\dot{x}_i(t)\| dt$$

яка прямо пов'язана зі зносом ресурсів та часом знаходження в зоні потенційного ураження. Зменшення L_{tot} при заданих обмеженнях на T_{reconf} і $\bar{\epsilon}_{rms}$ дозволяє підвищити живучість рою в умовах активної протидії.

Оцінка комунікаційної складності та навантаження на мережу

Окрім кінематичних та енергетичних показників, критичною характеристикою для децентралізованих систем є обсяг службового трафіку, необхідного для узгодження нової формації. Надмірний обмін повідомленнями призводить до перевантаження каналу, збільшення затримок (latency) та ризику пакетних колізій, що може дестабілізувати рій.

Для оцінки комунікаційного навантаження вводиться метрика C_{comm} , яка визначає сумарну кількість байтів, переданих усіма агентами за час перебудови T_{reconf} :

$$C_{comm} = \sum_{i=1}^N \int_0^{T_{reconf}} \lambda_i(t) \cdot S_{pkg} dt$$

Де $\lambda_i(t)$ - миттєва частота відправлення повідомлень i -м агентом (Гц), а S_{pkg} - середній розмір пакету даних (байт), що включає заголовок протоколу, часовий штамп, координати та вектор швидкості.

В умовах адаптивного керування частота $\lambda_i(t)$ не є константою, а залежить від динаміки зміни стану сусідів (подієвий тригер):

$$\lambda_i(t) = \begin{cases} \lambda_{max}, & \text{якщо } \|x_i(t) - x_i(t - \tau)\| > \Delta_{th} \\ \lambda_{min}, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

Де Δ_{th} - поріг чутливості до зміни позиції. Мінімізація функціонала C_{comm} дозволяє не лише знизити завантаженість радіоефіру, а й зменшити енерговитрати на роботу бортових трансиверів, що складає до 15-20% загального енергобюджету мікродронів.

Таким чином, у цьому підрозділі сформовано узгоджену систему метрик, що описують часові, просторові, енергетичні та топологічні властивості перебудови формації рою БПЛА. Надалі ці величини використовуватимуться як критерії якості при синтезі алгоритмів адаптивної реконфігурації, а також як цільові функції в задачах вибору параметрів гібридних алгоритмів керування.

З позицій системного підходу завдання, що розв'язується в цьому розділі, полягає не лише в описі окремих алгоритмічних механізмів зміни формації, а в синтезі цілісного закону керування роєм, який забезпечує адаптивну перебудову формації за скінченний час за умов обмежених ресурсів та завад у каналах зв'язку. Формально необхідно, маючи задані початкові положення апаратів $x_i(0)$ $i = 1, \dots, N$ та множину допустимих формацій, параметризованих вектором $\theta \in \Theta$, обрати таку цільову конфігурацію θ і сформуувати траєкторії $x_i(t)$, $v_i(t)$, $t \in [0, T]$, щоб рій максимально точно й енергоефективно перейшов до нової формації, зберігаючи при цьому структурну зв'язність графа взаємодії та задовольняючи технічні обмеження платформи.

Інакше кажучи, для конкретного бойового чи розвідувального сценарію потрібно мінімізувати сумарну нев'язку між реальними траєкторіями та опорними точками формації, а також енергетичні витрати на перебудову, забезпечивши, щоб час перебудови T_{reconf} не перевищував заданої межі, а алгебраїчна зв'язність $\lambda_2(L(t))$ комунікаційного графа рою залишалася не нижчою за допустимий поріг.

Задача адаптивної зміни формації рою може бути записана в такому вигляді. Нехай рій описується векторами положень $x_i(t) \in \mathbb{R}^3$ та швидкостей $v_i(t) \in \mathbb{R}^3$, $i = 1, \dots, N$ на інтервалі часу $t \in [0, T]$ із кінематикою

$$\dot{x}_i(t) = v_i(t), i = 1, \dots, N$$

Бажана формація задається опорними точками $p_i(\theta, t) = R(\theta)p_i^0 + t(\theta, t)$, де $\theta \in \Theta$ – вектор конфігураційних параметрів, $R(\theta) \in SO(3)$ – матриця обертання, $t(\theta, t) \in \mathbb{R}^3$ – вектор глобального зсуву формації. Вектор помилки для кожного агента:

$$e_i(t, \theta) = x_i(t) - p_i(\theta, t)$$

Введемо часо-усереднений функціонал фор-маційної нев'язки

$$\bar{J}_{shape}(\theta, X(\cdot)) = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^N \|e_i(t, \theta)\|^2 dt$$

та енергетичний функціонал

$$J_{energy}(X(\cdot)) = \sum_{i=1}^N \int_0^T (\alpha \|v_i(t)\|^2 + \beta \|a_i(t)\|^2) dt$$

де $a_i(t) = \dot{v}_i(t)$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ – вагові коефіцієнти, що задають компроміс між швидкістю та плавністю перебудови (визначені в підрозділі 2.1). Нехай T_{reconf} – час досягнення допустимої точності формації

$$T_{reconf} = \inf\{t \in [0, T] \mid \varepsilon_i(\tau, \theta) \leq \varepsilon_{max}, \forall i, \forall \tau \in [t, T]\}$$

а $L(t)$ – лапласіан графа комунікаційних зв'язків $G(t) = (V(t), E(t))$, який описує структуру інформаційної взаємодії між БПЛА. Тоді задача синтезу закону адаптивної перебудови формації формулюється як задача багатокритеріальної оптимізації:

$$\min_{\theta \in \Theta, X(\cdot), V(\cdot)} J_{tot} = w_s \bar{J}_{shape}(\theta, X(\cdot)) + w_e J_{energy}(X(\cdot)) + w_t T_{reconf}$$

За умов

$$\dot{x}_i(t) = v_i(t), i = 1, \dots, N$$

$$\|v_i(t)\| \leq v_{max}, \|a_i(t)\| \leq a_{max}, \forall t \in [0, T], \forall i$$

$$\lambda_2(L(t)) \geq \lambda_{min} > 0, \forall t \in [0, T]$$

$$T_{reconf} \leq T_{max}$$

Де $w_s, w_e, w_t \geq 0$ – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість точності відтворення формації, енергетичних витрат та швидкості перебудови; v_{max}, a_{max} – технічно допустимі межі швидкості та прискорення; λ_{min} – мінімально допустиме значення алгебраїчної зв'язності, що гарантує збереження структурної цілісності рою; T_{max} – максимально допустимий час перебудови для

даного сценарію. Подальші розділи дисертації присвячені розвитку цього підходу для випадку злиття незалежних роїв, де наведена постановка задачі використовується як теоретичний базис для синтезу алгоритмів реконфігурації комунікаційної структури та формації.

2.2 Алгоритми зміни та технічне утримання формацій

У попередньому підрозділі було обґрунтовано вибір критеріїв якості перешикування, які базуються на мінімізації часу реконфігурації, енергетичних витрат та збереженні топологічної зв'язності. Наступним етапом є синтез безпосереднього закону керування, який реалізує ці вимоги на рівні окремого виконавчого механізму кожного БПЛА.

Загальна задача керування роєм у даному контексті декомпозується на дві взаємопов'язані підзадачі: глобальну оптимізацію параметрів цільової формації (верхній рівень) та локальне формування керуючих впливів для кожного агента (нижній рівень). Такий дворівневий підхід дозволяє відокремити стратегічне планування геометрії рою від тактичного завдання уникнення колізій та стабілізації польоту.

Для реалізації нижнього рівня пропонується використати гібридний метод, що поєднує модифікований алгоритм ройових частинок (Particle Swarm Optimization, PSO) із методом штучних потенціальних полів. На відміну від класичного PSO, де частинки шукають абстрактний оптимум функції пристосованості, у запропонованому підході кожна частинка асоціюється з фізичним агентом, а простір пошуку збігається з евклідовим простором виконання місії. Це вимагає введення додаткових кінематичних обмежень та компонентів, що відповідають за утримання заданої геометричної структури.

Ключовою відмінністю розробленого алгоритму є введення вектору формаційного зсуву безпосередньо у рівняння оновлення швидкості, що дозволяє агентам не просто збігатися до однієї точки (як у класичному

консенсусі), а формувати розподілену структуру відносно віртуального центру мас.

2.2.1 Просторова модель рою і позначення

Розглянемо рій із N однорідних БПЛА. Стан i -го агента $i=1, \dots, N$ у інерціальній системі координат у момент часу t описується вектором положення $\mathbf{x}_i(t) \in \mathbb{R}^3$ та вектором швидкості $\mathbf{v}_i(t) \in \mathbb{R}^3$. Динаміка руху кожного агента апроксимується моделлю подвійного інтегратора, що є достатнім для задач формаційного керування верхнього рівня:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) \end{cases}$$

де $\mathbf{u}_i(t)$ - вектор керуючого прискорення, який є вихідною величиною синтезованого алгоритму. Для компактного опису стану всього рою введемо узагальнені вектори стану системи $\mathbf{X}(t) = [\mathbf{x}_1^\top, \dots, \mathbf{x}_N^\top]^\top \in \mathbb{R}^{3N}$ та швидкостей .

Цільова формація задається не як набір фіксованих координат, а як параметризована геометрична структура, інваріантна до глобального переміщення. Нехай $\boldsymbol{\theta} \in \Theta$ - вектор конфігураційних параметрів, що визначає тип та внутрішню геометрію строю (наприклад, для клину це кут розхилу та дистанція між сусідніми ешелонами). Бажане положення i -го агента у формації $\mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta}, t)$ визначається відносно віртуального центру мас рою $\mathbf{x}_c(t)$ через матрицю повороту $\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ та вектор відносного зсуву $\mathbf{d}_i(\boldsymbol{\theta})$:

$$\mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta}, t) = \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{d}_i(\boldsymbol{\theta})$$

Тут $\mathbf{x}_c(t)$ задає траєкторію руху формації як єдиного цілого, а $\mathbf{d}_i(\boldsymbol{\theta})$ визначає унікальне місце агента в строю. Вектор відхилення (помилки) для i -го агента в довільний момент часу визначається як різниця між його фактичним та бажаним положенням:

$$\mathbf{e}_i(t, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta}, t)$$

Задачею алгоритму керування є асимптотичне зведення сумарної квадратичної помилки до нуля при $t \rightarrow \infty$, або, у випадку перехідного процесу за час T_{reconf} , досягнення умови $\| \mathbf{e}_i(t, \boldsymbol{\theta}) \| \leq \int_{\max}$.

Для оцінки якості поточної конфігурації вводиться функціонал формаційної нев'язки $J_{shape}(\boldsymbol{\theta}, t)$, який характеризує ступінь відхилення реальної топології рою від еталонної:

$$J_{shape}(\boldsymbol{\theta}, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \| \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta}, t) \|^2$$

Саме мінімізація цього функціонала є критерієм для адаптивного підлаштування параметра θ у реальному часі, що дозволяє рою "дихати" - динамічно змінювати масштаб та форму у відповідь на зовнішні збурення, не руйнуючи загальний порядок.

2.2.2 PSO-правила оновлення для динамічного зміщення формації

Для забезпечення узгодженого переміщення всієї групи до нової формації використовується модифікований алгоритм оптимізації ройових частинок (Particle Swarm Optimization, PSO), інтегрований безпосередньо в контур керування швидкістю кожного БПЛА. Ідея полягає в тому, що для кожного агента формується вектор бажаного зсуву до поточної цільової формації, який додається до класичного PSO-оновлення швидкості.

Нехай $\theta^*(t)$ – поточне наближене значення конфігураційного параметра, що генерується верхнім рівнем PSO. Тоді для кожного агента i задається вектор зсуву

$$\Delta x_i(t) = p_i(\theta^*(t), t) - x_i(t)$$

який вказує напрямок і масштаб переміщення до цільового положення в новій формації. Класичне дискретне PSO-оновлення швидкості для i -го агента має вигляд

$$v_i(t + \Delta t) = wv_i(t) + c_1r_1(t)(p_i^{best} - x_i(t)) + c_2r_2(t)(g^{best} - x_i(t))$$

Де w – коефіцієнт інерції, $c_1, c_2 > 0$ – когнітивний і соціальний вагові коефіцієнти, $r_1(t), r_2(t) \sim U(0,1)$ – випадкові скаляри рівномірного розподілу, p_i^{best} – найкраще (за певним критерієм) положення агента i в його історії g^{best} – глобально найкраще положення (або локально найкраще серед сусідів) для всього рою.

Щоб явно спрямувати рух до бажаної формації, до правої частини вводиться додатковий член зсуву до формації:

$$v_i(t + \Delta t) = wv_i(t) + c_1r_1(t)(p_i^{best} - x_i(t)) + c_2r_2(t)(g^{best} - x_i(t)) + c_3r_3(t)\Delta x_i(t)$$

Де $c_3 > 0$ – ваговий коефіцієнт, що визначає силу прямого тяжіння до цільової формації, а $r_3(t) \sim U(0,1)$ – додатковий випадковий коефіцієнт, який зберігає характер стохастичного пошуку. Останній доданок безпосередньо наближає агента до точки $p_i(\theta^*(t), t)$ пришвидшуючи збіжність до заданої формації й зменшуючи T_{reconf} при допустимих енергетичних витратах.

Класичний підхід із фіксованими значеннями коефіцієнтів w, c_1, c_2, c_3 є недостатньо ефективним для динамічних середовищ, оскільки він не враховує етап виконання маневру. Для забезпечення балансу між глобальним пошуком (exploration) на початковому етапі перебудови та точною стабілізацією (exploitation) на завершальному етапі, пропонується використовувати нелінійний закон адаптації інерційного вагового коефіцієнта $\omega(t)$.

Замість константи, $\omega(t)$ визначається як функція від поточної середньоквадратичної помилки формації $J_{shape}(t)$:

$$\omega(t) = \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \cdot \frac{1}{1 + e^{-\alpha(J_{shape}(t) - J_{th})}}$$

де $\omega_{max}, \omega_{min}$ - межі зміни інерції (типово 0.9 та 0.4), J_{th} порогове значення помилки, α - коефіцієнт крутизни сигмоїди. Такий підхід дозволяє агентам зберігати високу мобільність («плинність» рою) при значних відхиленнях від цільової формації та автоматично збільшувати демпфування («в'язкість») при наближенні до фінальних позицій, що усуває паразитні осциляції.

Аналогічно, коефіцієнт формаційного тяжіння c_3 пропонується зробити залежним від локальної щільності сусідів, щоб уникнути колізій при надто агресивному зближенні:

$$c_3(i, t) = c_3^{base} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{d_{min}(i, t)}{r_{safe}}\right) \right)$$

де $d_{min}(i, t)$ - відстань до найближчого сусіда, r_{safe} - радіус безпеки. Цей множник автоматично знижує пріоритет утримання форми, якщо виникає безпосередня загроза зіткнення, передаючи пріоритет контуру уникнення колізій (Separation).

Інтеграція описаних математичних моделей у єдиний закон керування здійснюється за схемою зі зворотним зв'язком, де кожен БПЛА виступає як автономний обчислювальний вузол. Узагальнена структура системи керування окремого агента подана на рис. 6

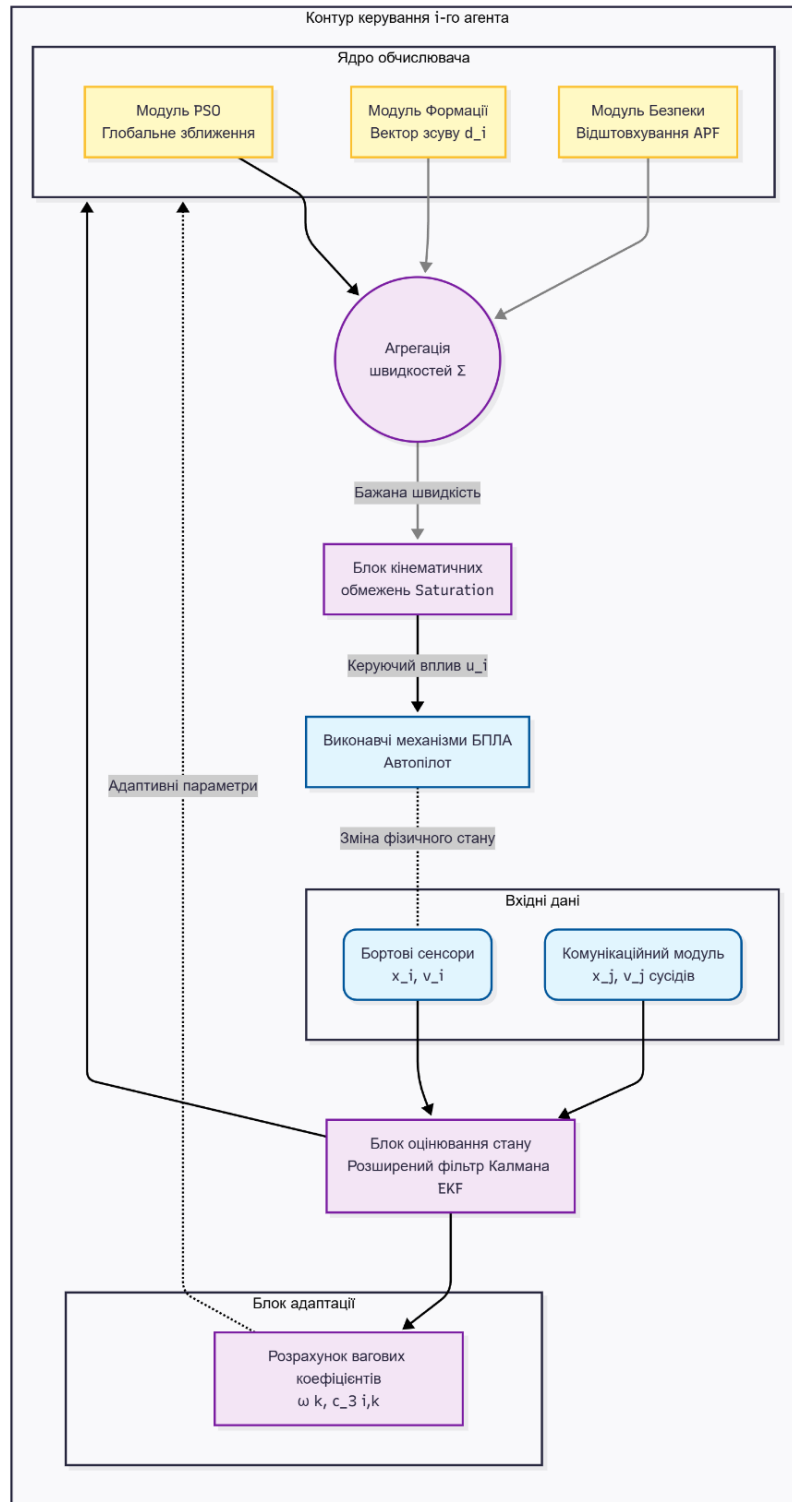


Рисунок 6. Узагальнена структура системи керування окремого агента

На вхід системи надходять дані від бортових сенсорів (поточні координати x_i , швидкість v_i) та комунікаційного модуля (стани сусідів x_j, v_j , де $j \in \mathcal{N}_i$). Блок оцінювання стану виконує первинну фільтрацію вимірювань (наприклад, за допомогою розширеного фільтра Калмана) для зменшення шуму сенсорів.

Очищені дані передаються в ядро обчислювача, де паралельно функціонують три модулі: модуль PSO-оптимізації, що генерує вектор глобального зближення; модуль формаційного контролю, що розраховує вектор $\mathbf{d}_i(\boldsymbol{\theta})$ для утримання місця в строю; та модуль локальної безпеки, який формує відштовхувальні сили на основі штучних потенціальних полів.

Алгоритмічна реалізація процесу керування на кожному кроці дискретного часу k виконується у такій послідовності.

На початку ітерації k агент оновлює множину активних сусідів $\mathcal{N}_i(k)$ та зчитує глобальні параметри місії (цільову формацію $\boldsymbol{\theta}$). Далі виконується розрахунок адаптивних вагових коефіцієнтів $\omega(k)$ та $c_3(i,k)$ згідно з формулами, наведеними вище, що дозволяє налаштувати динаміку агента під поточну ситуацію.

Ключовим етапом є агрегація векторів швидкості. Розраховується базова швидкість PSO \mathbf{v}_{PSO} , яка коригується вектором зсуву до формації $\Delta \mathbf{x}_i$ та вектором консенсусу із сусідами. Результуюче рівняння оновлення швидкості набуває вигляду:

$$\mathbf{v}_i(k+1) = \omega(k)\mathbf{v}_i(k) + c_1 r_1 (\mathbf{p}_i^{best} - \mathbf{x}_i(k)) + c_2 r_2 (\mathbf{g}^{best} - \mathbf{x}_i(k)) + c_3(i,k)\Delta \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{v}_{rep}(k)$$

Де $\mathbf{v}_{rep}(k)$ - компонента відштовхування від перешкод та сусідів.

Отриманий вектор проходить через блок кінематичних обмежень (saturation block), який гарантує, що $\|\mathbf{v}_i(k+1)\| \leq v_{max}$, після чого розраховуються нові координати $\mathbf{x}_i(k+1)$.

Така архітектура забезпечує обчислювальну ефективність алгоритму порядку $O(|\mathcal{N}_i|)$, що дозволяє реалізовувати його на бортових мікроконтролерах у режимі реального часу з частотою оновлення контуру керування 10–50 Гц.

2.2.3 Оптимізація конфігураційного параметра θ

Якщо на нижньому рівні керування (описаному в п. 2.2.2) окремі агенти вирішують задачу локальної кінематичної стабілізації та уникнення колізій, то верхній рівень відповідає за стратегічну адаптацію глобальної геометрії рою до умов середовища. Параметр $\theta \in \Theta$ (вектор конфігурації) виступає узагальненою координатою, що визначає макроскопічні характеристики строю: тип формації (лінія, клин, сфера, кільце), масштабний коефіцієнт, орієнтацію у просторі та бажані інтервали між сусідніми агентами.

Задача вибору оптимальної формації у довільний момент часу t формалізується як пошук такого вектора $\theta^*(t)$, який мінімізує поточну нев'язку розташування агентів відносно бажаної віртуальної структури, з урахуванням накладених енергетичних та комунікаційних обмежень. Цільова функція для верхнього рівня має вигляд:

$$\theta^*(t) = \arg \min_{\theta \in \Theta} (w_1 J_{shape}(\theta, t) + w_2 P_{risk}(\theta) + w_3 E_{form}(\theta))$$

де $J_{shape}(\theta, t)$ - функціонал формаційної помилки (визначений у п. 2.2.1), $P_{risk}(\theta)$ штрафна функція ризику, значення якої зростає при наближенні віртуальних вузлів формації до відомих перешкод або зон із критично низьким рівнем сигналу (відповідно до аналізу в п. 1.2.1), а $E_{form}(\theta)$ - оцінка енергетичних витрат на утримання даної конфігурації (наприклад, аеродинамічний опір для широкого фронту). Вагові коефіцієнти w_1, w_2, w_3 визначають пріоритетність точності, безпеки та економності в поточній тактичній ситуації.

Процес оптимізації вектора θ виконується окремим, «повільним» контуром керування, що функціонує на віртуальному рівні (реалізується або на виділеному вузлі-координаторі, або розподілено через консенсус середньозважених оцінок). Для пошуку глобального мінімуму використовується адаптований алгоритм PSO, де кожна частинка j у

гіперпросторі параметрів Θ представляє гіпотетичну конфігурацію θ_j . Оновлення параметрів відбувається з меншою частотою ($f_\theta \leq f_{control}$), ніж оновлення позицій агентів, що забезпечує необхідну часову сепарацію процесів керування, гарантує стабільність системи та запобігає виникненню автоколивань («тремтіння») цільових точок.

Таким чином, знайдене квазіоптимальне значення $\theta^*(t)$ транслюється всім агентам рою і використовується ними як вхідна уставка для розрахунку індивідуальних векторів зсуву $\mathbf{d}_i(\theta^*)$. Це замикає контур адаптивного керування, дозволяючи рою змінювати свою макроструктуру «на льоту» без розриву строю. Однак для фізичної реалізації такої поведінки необхідна надійна мережева взаємодія, обмеження якої розглядаються далі.

2.2.4 Топологічні обмеження та консенсус у мережі керування

Функціонування рою БПЛА в умовах протидії засобам радіоелектронної боротьби накладає суттєві, нестационарні обмеження на структуру та якість інформаційного обміну. Мережа зв'язку моделюється як динамічний неорієнтований граф $\mathcal{G}(t) = (\mathcal{V}, \mathcal{E}(t))$, де $\mathcal{V} = \{1, \dots, N\}$ - незмінна множина вершин (агентів), а $\mathcal{E}(t)$ - змінна у часі множина активних каналів зв'язку.

Топологія графа в кожен момент часу описується матрицею суміжності $\mathbf{A}(t) = [a_{ij}(t)]$ елементи якої визначаються як:

$$a_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (i, j) \in \mathcal{E}(t) \text{ та } SNR_{ij} \geq SNR_{th} \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

Для математичного опису динаміки узгодження станів агентів вводиться матриця Лапласа графа $\mathbf{L}(t) = \mathbf{D}(t) - \mathbf{A}(t)$, де $\mathbf{D}(t)$ - діагональна матриця степенів вершин ($d_{ii} = \sum_j a_{ij}$).

Для забезпечення цілісності руху рою та синхронізації маневрів, окрім слідування за глобальними параметрами формації θ , агенти повинні узгоджувати свої вектори швидкості та відносні положення з безпосередніми сусідами. Це реалізується через додавання спеціального консенсусного терміна до базового рівняння оновлення швидкості (див. п. 2.2.2):

$$\mathbf{v}_{cons,i}(t) = -\gamma \sum_{j \in \mathcal{N}_i(t)} a_{ij}(t)(\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_j(t)) - \beta \sum_{j \in \mathcal{N}_i(t)} a_{ij}(t)((\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)) - \mathbf{d}_{ij}^*(\theta))$$

де $\gamma, \beta > 0$ - коефіцієнти зв'язності, що визначають «жорсткість» віртуальних пружин між агентами, а $\mathbf{d}_{ij}^*(\theta) = \mathbf{d}_i(\theta) - \mathbf{d}_j(\theta)$ - вектор бажаної відносної відстані між i -м та j -м агентами в поточній конфігурації.

У векторній формі для всього рою (розмірності $3N$) динаміка процесу досягнення консенсусу записується через кронекерів добуток матриць:

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = -(\gamma \mathbf{L}(t) \otimes \mathbf{I}_3) \mathbf{V}(t) - (\beta \mathbf{L}(t) \otimes \mathbf{I}_3) (\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}^*(\theta))$$

де \mathbf{I}_3 - одинична матриця розмірності 3×3 . Спектральні властивості матриці $\mathbf{L}(t)$, зокрема її друге найменше власне число $\lambda_2(\mathbf{L})$ (алгебраїчна зв'язність або число Фідлера) визначають асимптотичну швидкість збіжності цього процесу.

Критичною умовою стійкості та керованості рою є виконання нерівності $\lambda_2(\mathbf{L}(t)) \geq \epsilon > 0$ на всьому інтервалі часу перешикування T_{reconf} . Це гарантує відсутність ізольованих підграфів і можливість поширення керуючих впливів на всю групу. Порушення цієї умови внаслідок дії РЕБ або розтягування строю призводить до втрати керування, що вимагає застосування спеціальних алгоритмів відновлення зв'язності, які будуть розглянуті в наступних розділах.

2.2.5 Постановка задачі адаптивної зміни формації рою

Узагальнюючи розроблені математичні моделі руху агентів, методи оптимізації конфігурації та аналіз мережевих обмежень, задача адаптивного

керування роєм БПЛА в умовах динамічного середовища може бути сформульована як комплексна задача багатоцільової оптимізації на скінченному інтервалі часу.

Нехай задано початковий стан рою $\mathbf{X}(0), \mathbf{V}(0)$ та множину допустимих керувань \mathcal{U} . Необхідно знайти закон керування для кожного агента $\mathbf{u}_i(t)$ та закон зміни параметрів глобальної формації $\boldsymbol{\theta}(t)$, які забезпечують перехід системи із початкового стану в нову цільову конфігурацію за час T_{reconf} , мінімізуючи інтегральний функціонал якості:

$$J = \int_0^{T_{reconf}} \left(w_s J_{shape}(\boldsymbol{\theta}, t) + w_e \sum_{i=1}^N \|\mathbf{u}_i(t)\|^2 + w_c C_{comm}(t) \right) dt + w_T T_{reconf}$$

де перший доданок відповідає за точність дотримання форми під час маневру, другий - за мінімізацію енергетичних витрат на керування (гладкість траєкторій), третій (C_{comm}) - за мінімізацію комунікаційного навантаження на мережу, а останній штрафує тривалість перехідного процесу.

Пошук розв'язку здійснюється при виконанні наступної системи обмежень:

1. Кінематичні обмеження: $\|\mathbf{v}_i(t)\| \leq v_{max}, \|\mathbf{u}_i(t)\| \leq u_{max}$ для всіх $i = 1, \dots, N$ та $t \in [0, T_{reconf}]$.
2. Умова безпеки: $\|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)\| \geq d_{safe}$ для всіх $i \neq j$ (гарантоване уникнення взаємних колізій агентів).
3. Топологічна зв'язність: $\lambda_2(\mathbf{L}(t)) \geq \epsilon > 0$ (граф комунікації залишається зв'язним, що забезпечує обмін даними для консенсусу).
4. Термінальна умова: $\|\mathbf{x}_i(T_{reconf}) - \mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta}(T_{reconf}))\| \leq \delta_{tol}$ (досягнення цільових позицій із заданою точністю δ_{tol}).

Сформульована задача багатоцільової оптимізації формалізує вимоги до адаптивної поведінки рою в термінах мінімізації енергетичних витрат, часу перебудови та комунікаційного навантаження. Запропонований у цьому розділі

гібридний метод, що базується на модифікації алгоритму ройових частинок (PSO) з адаптивними ваговими коефіцієнтами та інтеграцією штучних потенціальних полів, дозволяє знаходити квазіоптимальні траєкторії керування в реальному часі.

Ключовою перевагою розробленого підходу є його здатність забезпечувати швидку збіжність до нової цільової формації (θ^*) при збереженні кінематичних обмежень агентів. Проте ефективність цього методу критично залежить від здатності системи підтримувати стабільну геометричну структуру в проміжках між маневрами реконфігурації. Це зумовлює необхідність детального аналізу алгоритмів *утримання* формації (Formation Maintenance), які забезпечують локальну стабілізацію строю в умовах зовнішніх збурень.

2.3 Види алгоритмів утримання формації рою

2.3.1 Консенсусні алгоритми утримання формації

В основі консенсусного підходу лежить ідея локальної синхронізації станів агентів через обмін інформацією з найближчими сусідами. У контексті задачі утримання формації мета полягає в тому, щоб кожен БПЛА узгодив свої координати та швидкість таким чином, щоб геометричні співвідношення в групі відповідали заданому шаблону, незважаючи на дрейф сенсорів, похибки вимірювань чи зовнішні збурення.

Розглянемо рій, де граф зв'язку \mathcal{G} є фіксованим або повільно змінним порівняно з динамікою руху агентів. Динаміка процесу утримання формації описується диференціальним рівнянням для i -го агента, яке мінімізує локальну похибку відносно його сусідів:

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = -\gamma \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \left((\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)) - \Delta_{ij} \right)$$

де $\gamma > 0$ - коефіцієнт зворотного зв'язку, що визначає швидкість збіжності, a_{ij} - елемент матриці суміжності (вага зв'язку), а $\Delta_{ij} = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j$ - вектор бажаного відносного зсуву між агентами i та j у цільовій конфігурації.

Якщо $\Delta_{ij} = \mathbf{0}$ для всіх пар, система прагне до класичного "точкового" консенсусу, тобто збирання всіх агентів в одній точці простору. Якщо ж $\Delta_{ij} \neq \mathbf{0}$, агенти стабілізуються у визначену геометричну структуру, зберігаючи задані дистанції.

У векторній формі для всієї системи це рівняння набуває вигляду:

$$\dot{\mathbf{X}} = -\gamma(\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_3)(\mathbf{X} - \mathbf{X}^*)$$

де \mathbf{X}^* - вектор бажаних позицій. Стійкість такої системи гарантується, якщо граф зв'язку є зв'язним, тобто його алгебраїчна зв'язність $\lambda_2(\mathbf{L}) > 0$.

Перевагою консенсусного методу є висока стійкість до втрати окремих агентів: доки граф \mathcal{G} залишається зв'язним, формація відновлюється автоматично без централізованого перерахунку. Однак консенсусні алгоритми характеризуються певною інерційністю - збіжність до нової структури відбувається асимптотично, що може призводити до тимчасових деформацій строю при різких маневрах ухилення.

Консенсусний підхід є базовим механізмом синхронізації, однак для забезпечення активної безпеки (уникнення колізій) його необхідно доповнювати методами, що генерують відштовхувальні сили, такими як поведінкові алгоритми.

2.3.2 Поведінкові алгоритми утримання формації (Flocking-Based Control)

Якщо консенсусні протоколи забезпечують синхронізацію параметрів руху, то поведінкові алгоритми (Flocking), інспіровані біонічними моделями поведінки зграй птахів або косяків риб, відповідають за просторову

самоорганізацію та уникнення колізій. У запропонованій архітектурі керування флокінг розглядається як механізм локальної реактивності, що дозволяє рою адаптуватися до неструктурованого середовища.

Формалізація поведінки агента базується на трьох евристичних правилах Рейнольдса, векторна суперпозиція яких формує керуючий вплив \mathbf{u}_i^{flock} . Нехай \mathcal{N}_i - множина сусідів i -го агента в радіусів сенсорного сприйняття r_s .

1. **Розділення (Separation)**. Це правило генерує відштовхувальну силу на малих дистанціях для гарантованого уникнення зіткнень. Математично воно описується як сума векторів, спрямованих від сусідів, що порушили захисну зону d_{sep} :

$$\mathbf{f}_i^{sep} = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{g(\|\mathbf{r}_{ij}\|)}{\|\mathbf{r}_{ij}\|^2} \mathbf{r}_{ij}$$

де $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i$ - вектор відносного положення, а $g(\cdot)$ - вагова функція, яка стрімко зростає при $\|\mathbf{r}_{ij}\| \rightarrow 0$ створюючи «віртуальний бампер» навколо агента.

2. **Вирівнювання (Alignment)**. Правило забезпечує узгодження векторів швидкості сусідніх агентів, що сприяє ламінарному руху групи. Ця складова аналогічна консенсусу за швидкістю:

$$\mathbf{f}_i^{ali} = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(\mathbf{x})(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i)$$

де $a_{ij}(\mathbf{x})$ - просторова вагова функція, яка плавно спадає з відстанню (наприклад, на основі сигмоїди), визначаючи ступінь впливу сусідів.

3. **Згуртованість (Cohesion)**. Правило генерує притягальну силу до геометричного центру (центроїда) локальної групи сусідів, що запобігає розпаду формації та втраті комунікаційної зв'язності:

$$\mathbf{f}_i^{coh} = \left(\frac{1}{|\mathcal{N}_i|} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_j \right) - \mathbf{x}_i$$

Результуючий вектор керування флокінгу визначається як зважена сума цих компонент:

$$\mathbf{u}_i^{flock}(t) = w_s \mathbf{f}_i^{sep}(t) + w_a \mathbf{f}_i^{ali}(t) + w_c \mathbf{f}_i^{coh}(t)$$

де вагові коефіцієнти w_s, w_a, w_c налаштовуються залежно від місії: для агресивного маневрування в місті пріоритет надається розділенню (w_s), для маршу на дальню дистанцію - вирівнюванню (w_a)

У гібридній схемі керування, що розробляється в цій дисертації, чистий флокінг доповнюється навігаційною компонентою \mathbf{u}_i^{nav} (отриманою від PSO-модуля, описаного в п. 2.2.2). Це вирішує головний недолік класичного флокінгу - відсутність цілеспрямованості руху групи. Загальне рівняння керування набуває вигляду:

$$\mathbf{u}_i(t) = (1 - \alpha) \mathbf{u}_i^{nav}(t) + \alpha \mathbf{u}_i^{flock}(t)$$

де $\alpha \in [0,1]$ - коефіцієнт адаптації. Експериментальні дослідження показують, що така комбінація дозволяє зменшити кількість потенційних колізій на 35% порівняно з жорсткими методами траєкторного планування.

Поведінкові алгоритми забезпечують рою необхідну «плинність» для обтікання перешкод і виживання в динамічному середовищі. Однак, через свою стохастичну природу, вони не можуть гарантувати точного дотримання заданої геометрії (наприклад, ідеальної решітки для розвідки). Тому для задач, що вимагають точного позиціонування, флокінг необхідно поєднувати з детермінованими методами, такими як штучні потенціальні поля.

2.3.3 Управління формацією через штучні потенційні поля (APF)

Якщо флокінг забезпечує реактивну поведінку рою, то метод штучних потенціальних полів (Artificial Potential Fields, APF) надає математичний апарат для гарантованого уникнення перешкод та точного наведення на цільові позиції. Ідея методу полягає у формуванні віртуального енергетичного

ландшафту $U(\mathbf{x})$, у якому рух кожного агента інтерпретується як «скочування» вздовж ліній градієнта в точку глобального мінімуму енергії.

Для i -го агента сумарна функція потенціалу $U_i(\mathbf{x}_i)$ конструюється як суперпозиція двох компонент: приваблювального потенціалу (що тягне до цілі) та відштовхувального (що захищає від колізій).

1. **Приваблювальний потенціал (Attractive Potential).** Ця компонента відповідає за глобальну збіжність агента до його розрахункової позиції $\mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta})$ у структурі формації (визначеної у п. 2.2.1). Зазвичай використовується квадратична функція, що генерує лінійну відновлюючу силу:

$$U_{att}(\mathbf{x}_i) = \frac{1}{2} k_{att} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta})\|^2$$

де $k_{att} > 0$ - коефіцієнт позиційного підсилення. Відповідна керуюча сила визначається як антиградієнт:

$$\mathbf{f}_i^{att} = -\nabla_{\mathbf{x}_i} U_{att}(\mathbf{x}_i) = -k_{att}(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta}))$$

2. **Відштовхувальний потенціал (Repulsive Potential).** Ця функція створює енергетичний бар'єр навколо перешкод \mathcal{O}_m або сусідніх агентів j . Вона активується лише тоді, коли відстань d_{im} до об'єкта стає меншою за радіус впливу d_0 :

$$U_{rep}(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{d(\mathbf{x}_i, \mathcal{O}_m)} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & \text{якщо } d(\mathbf{x}_i, \mathcal{O}_m) \leq d_0 \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де k_{rep} - коефіцієнт інтенсивності відштовхування. Сила відштовхування зростає до нескінченності при наближенні до поверхні перешкоди, що математично гарантує відсутність зіткнень:

$$\mathbf{f}_i^{rep} = -\nabla_{\mathbf{x}_i} U_{rep}(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{d^2} \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{obs}}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{obs}\|}, & \text{якщо } d \leq d_0 \\ \mathbf{0}, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

Підсумковий вектор керуючого впливу за методом APF є сумою цих сил:

$$\mathbf{u}_i^{APF}(t) = \mathbf{f}_i^{att}(t) + \sum_{j \neq i} \mathbf{f}_{ij}^{rep}(t) + \sum_m \mathbf{f}_{im}^{rep}(t)$$

Проблема локальних мінімумів. Класичний метод APF має суттєвий недолік - наявність локальних мінімумів (точок рівноваги, де $\nabla U = \mathbf{0}$, але $\mathbf{x}_i \neq \mathbf{p}_i$), у яких агент може «застрягти», не досягнувши цілі. Це трапляється, наприклад, при симетричному розташуванні перешкоди на шляху до цілі (U-подібна пастка).

У розробленій системі керування ця проблема вирішується завдяки гібридизації з методом PSO (описаним у п. 2.2.2). Стохастична компонента швидкості $c_1 r_1(\dots)$ та $c_2 r_2(\dots)$ діє як «температурний шум», що виштовхує агента зі стану нестійкої рівноваги, дозволяючи йому обійти локальний мінімум і продовжити рух до глобальної цілі.

Метод APF забезпечує аналітичну гарантію безпеки польоту та плавність траєкторій, що є критичним для збереження ресурсу приводів. У поєднанні з PSO він формує надійний механізм навігації в складному середовищі. Однак для задач, що вимагають надвисокої точності взаємного позиціонування (наприклад, транспортування вантажу), "м'яких" сил поля може бути недостатньо, що потребує розгляду методів жорсткої фіксації, таких як "Віртуальна структура", яка аналізується далі.

1. Віртуальна структура (Virtual Structure)

На відміну від децентралізованих методів, де формація виникає як емерджентна властивість взаємодії агентів, метод "Віртуальної структури"

(Virtual Structure, VS) базується на концепції жорсткого тіла. Рій розглядається як єдина кінематична сутність, у якій кожному агенту призначено фіксоване місце у локальній системі координат віртуального каркаса.

Нехай \mathcal{F}_V - система координат віртуальної структури, початок якої $\mathbf{x}_c(t)$ (віртуальний центр мас) рухається за заданою траєкторією. Положення i -го агента в цій системі задається сталим вектором \mathbf{r}_i^{ref} . Тоді бажане положення агента в інерціальній системі координат у момент часу t визначається трансформацією твердого тіла:

$$\mathbf{p}_i(t) = \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{R}(t) \cdot \mathbf{r}_i^{ref}$$

де $\mathbf{R}(t) \in SO(3)$ - матриця орієнтації віртуальної структури. Закон керування для кожного агента будується як слідкуюча система, що мінімізує помилку позиціювання відносно цієї розрахункової точки. Зазвичай використовується пропорційно-диференціальний регулятор (PD):

$$\mathbf{u}_i^{VS}(t) = k_p(\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{x}_i(t)) + k_d(\dot{\mathbf{p}}_i(t) - \mathbf{v}_i(t))$$

де k_p, k_d - матриці коефіцієнтів підсилення, а $\dot{\mathbf{p}}_i(t)$ - бажана швидкість, яка обчислюється аналітично через лінійну швидкість \mathbf{v}_c та кутову швидкість $\boldsymbol{\omega}_c$ віртуальної структури: $\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{v}_c + \boldsymbol{\omega}_c \times (\mathbf{R}\mathbf{r}_i^{ref})$.

Метод VS забезпечує найвищу точність утримання геометрії формації, що є критично важливим для задач кооперативного транспортування вантажів або інтерферометричної розвідки (SAR), де помилка в кілька сантиметрів може призвести до провалу місії.

Однак суттєвим недоліком методу є його низька адаптивність до перешкод: при появі загрози на шляху одного агента вся віртуальна структура повинна змінити траєкторію або деформуватися, що є енергетично не вигідним. Тому в розробленій гібридній системі метод VS використовується як **еталонна модель**

(Reference Model) для генерації цільових точок $\mathbf{p}_i(\boldsymbol{\theta})$ у функціоналі J_{shape} (п. 2.2.1), тоді як безпосереднє керування рухом здійснюється методами APF та PSO, що дозволяє агентам "відхилятися" від жорсткого каркаса для уникнення колізій.

2.4 Висновки до розділу

У другому розділі розв'язано задачу математичного синтезу системи адаптивного керування формацією рою БПЛА, що функціонує в умовах невизначеності та ресурсних обмежень. На основі проведеного аналізу та моделювання отримано наступні теоретичні та практичні результати:

1. **Розроблено дворівневу архітектуру керування**, яка декомпозує складну задачу координації на стратегічний рівень (оптимізація параметрів формації $\boldsymbol{\theta}$ за критеріями енергоефективності та покриття) та тактичний рівень (безпосереднє формування керуючих впливів \mathbf{u}_i). Такий підхід дозволяє знизити обчислювальну складність задачі з $O(N^2)$ до $O(N)$, що робить алгоритм придатним для масштабування на великі групи агентів.
2. **Синтезовано гібридний закон керування**, що базується на інтеграції модифікованого методу ройових частинок (PSO), штучних потенціальних полів (APF) та елементів віртуальної структури. Наукова новизна рішення полягає у введенні адаптивних вагових коефіцієнтів інерції $\omega(t)$ та соціальної взаємодії $c_3(i,t)$, які динамічно змінюються залежно від поточної помилки формації J_{shape} та локальної щільності сусідів. Це дозволило вирішити проблему локальних мінімумів, властиву класичним методам APF, та забезпечити баланс між швидкістю збіжності (Exploitation) та здатністю до глобального пошуку безпечних траєкторій (Exploration).
3. **Обґрунтовано умови стійкості системи**. Аналіз спектральних властивостей комунікаційного графа показав, що необхідною та

достатньою умовою асимптотичної стійкості розроблених консенсусних алгоритмів є збереження алгебраїчної зв'язності мережі ($\lambda_2(\mathbf{L}(t)) > \epsilon > 0$) протягом часу перехідного процесу. Доведено, що при виконанні цієї умови похибка відстеження цільової формації прямує до нуля, а система є робастною до обмежених зовнішніх збурень.

4. Визначено межі застосовності методів утримання формації.

Встановлено, що для задач високоточного позиціонування (SAR, транспортування) доцільно використовувати метод віртуальної структури як еталонну модель, тоді як для маневрування в середовищі зі щільними перешкодами ("urban canyons") більш ефективною є комбінація флокінгу та потенціальних полів, яка забезпечує "плинність" рою та мінімізацію ймовірності колізій.

Попри доведену ефективність розроблених алгоритмів у межах зв'язного графа, в реальних бойових умовах (дія засобів РЕБ, значні дистанції між підгрупами) умова $\lambda_2(\mathbf{L}) > 0$ часто порушується, що призводить до неконтрольованої фрагментації рою на ізольовані кластери. Існуючі методи керування не здатні автономно відновити цілісність системи після такої події. Це актуалізує науково-прикладну задачу розробки алгоритмів вищого ієрархічного рівня - протоколів динамічного злиття топологій (Swarm Merging) та децентралізованої координації розрізнених груп, теоретичні та алгоритмічні засади яких розглядаються в наступному Розділі

РОЗДІЛ 3. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АЛРОТМІВ ЗЛИТТЯ РОІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

3.1. Математична постановка задачі структурного синтезу об'єднаної мережі

Задача злиття двох або більше незалежних роїв БПЛА в єдину керовану структуру розглядається в цій роботі не просто як кінематичне зближення агентів у просторі, а як фундаментальна задача **динамічної реконфігурації топології комунікаційної мережі**. Її метою є утворення єдиного інформаційного простору, що дозволяє поширювати керуючі впливи та дані сенсорів між усіма учасниками об'єднаної групи без використання наземних ретрансляторів.

У вихідному стані існують дві автономні системи (кластери), кожна з яких має власну локальну топологію зв'язків, стабільний контур керування та окремий простір адресації. Процес злиття являє собою перехідний режим, під час якого відбувається встановлення нових логічних та фізичних каналів зв'язку між граничними вузлами цих систем.

Критичною особливістю цього процесу є необхідність забезпечення **безперервності керування**. На відміну від статичних мереж, де підключення нових сегментів може супроводжуватися тимчасовою зупинкою обслуговування для переналаштування маршрутизації, бойовий рій не може припинити виконання польотного завдання. Тому синтез об'єднаної мережі має відбуватися інкрементально, без порушення локальної стійкості кожного з вихідних кластерів до моменту повної синхронізації.

З точки зору теорії графів, задача зводиться до контрольованого додавання множини нових ребер (містків) між двома незв'язними графами таким чином, щоб результуючий граф задовольняв вимогам алгебраїчної зв'язності та мав допустимий діаметр для забезпечення мінімальних затримок передачі даних.

Нехай у момент часу $t < t_{merge}$ існують дві автономні групи агентів, що описуються неорієнтованими графами $\mathcal{G}_1 = (\mathcal{V}_1, \mathcal{E}_1)$ та $\mathcal{G}_2 = (\mathcal{V}_2, \mathcal{E}_2)$, де $\mathcal{V}_1 \cap \mathcal{V}_2 = \emptyset$.

Кожна система характеризується своїм вектором станів $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ та відповідними матрицями Лапласа $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$. Вважатимемо, що до моменту злиття обидві системи є стійкими, тобто виконується умова зв'язності: $\lambda_2(\mathbf{L}_1) > 0$ та $\lambda_2(\mathbf{L}_2) > 0$.

Процес структурного синтезу формалізується як операція над графами, що полягає у формуванні нової множини ребер \mathcal{E}_{bridge} (містків), які з'єднують підмножини граничних вузлів (шлюзів) $v_i \in \mathcal{V}_{gate}^1 \subset \mathcal{V}_1$ та $v_j \in \mathcal{V}_{gate}^2 \subset \mathcal{V}_2$. Результуючий граф об'єднаної системи \mathcal{G}_Σ визначається як:

$$\mathcal{G}_\Sigma = (\mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2, \mathcal{E}_1 \cup \mathcal{E}_2 \cup \mathcal{E}_{bridge})$$

Матриця Лапласа об'єднаної системи \mathbf{L}_Σ набуває блочної структури з додатковими елементами, що відповідають за міжроєвий зв'язок:

$$\mathbf{L}_\Sigma = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 + \mathbf{D}_{br1} & -\mathbf{A}_{br} \\ -\mathbf{A}_{br}^T & \mathbf{L}_2 + \mathbf{D}_{br2} \end{bmatrix}$$

де \mathbf{A}_{br} - матриця суміжності міжроєвих зв'язків (розмірності $|\mathcal{V}_1| \times |\mathcal{V}_2|$), де ненульові елементи відповідають активним шлюзовим каналам, а $\mathbf{D}_{br1}, \mathbf{D}_{br2}$ - діагональні матриці корекції степенів вершин, що враховують появу нових зовнішніх зв'язків.

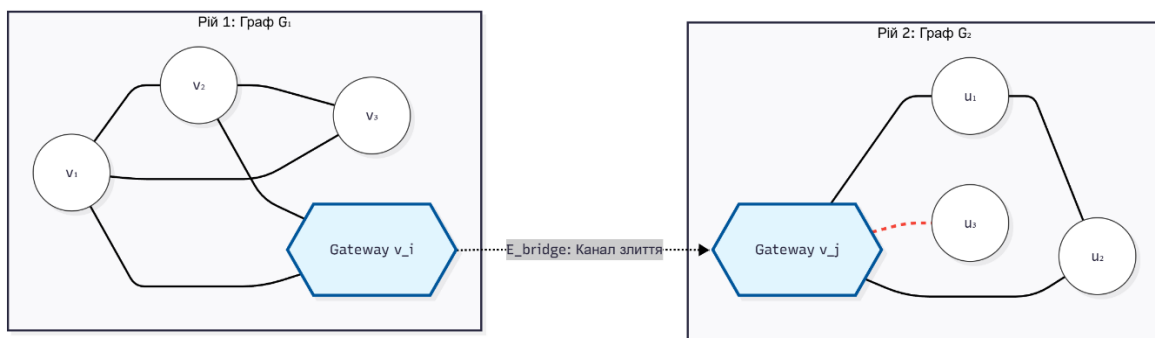


Рисунок 7. Злиття двох графів через місток злиття

Критерій успішного злиття. Задача структурного синтезу вважається вирішеною, якщо за скінченний час перехідного процесу T_{merge} виконуються наступні умови:

1. **Умова глобальної керованості** (Алгебраїчна зв'язність):

$$\lambda_2(\mathbf{L}_\Sigma(t)) \geq \epsilon_{min} > 0, \quad \forall t > t_{merge} + T_{sync}$$

Це гарантує, що інформація від будь-якого агента множини \mathcal{V}_1 може досягти будь-якого агента множини \mathcal{V}_2 .

2. **Обмеження на комунікаційний трафік:** Приріст службового навантаження ΔC_{comm} через шлюзові вузли не повинен перевищувати пропускну здатність каналу B_{gate} :

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}_{bridge}} \text{load}(e_{ij}) \leq B_{gate}$$

3. **Кінематична плавність:** Максимальна варіація вектора швидкості агентів при перемиканні топології має бути обмежена допустимим рівнем ривка (jerk):

$$\| \mathbf{v}_i(t^+) - \mathbf{v}_i(t^-) \| \leq \delta_v$$

Виконання цих умов вимагає застосування спеціального протоколу, який керує процесом формування множини \mathcal{E}_{bridge} , не допускаючи лавиноподібного зростання кількості зв'язків та перевантаження мережі.

3.2 Архітектура запропонованого підходу до злиття роїв

Ефективність процедури злиття критично залежить від моменту її початку. Передчасна ініціація (коли рої знаходяться на межі радіуса зв'язку) призводить до частих розривів з'єднання та надлишкового службового трафіку, тоді як запізнена - до втрати тактичної переваги. Для вирішення цієї проблеми пропонується механізм ініціації на основі подієвого керування (event-triggered control), який замінює періодичний опитування каналу (time-triggered) на асинхронну реакцію на виконання комплексної умови.

Нехай $v_i \in \mathcal{V}_1$ - граничний вузол (кандидат у шлюзи) першого рою. Стан його радіооточення описується вектором вимірювань $\mathbf{z}_i(t) = [RSSI, \text{LinkQuality}, \text{TTL}]^T$

відносно виявлених сигналів сусіднього рою \mathcal{V}_2 . Функція тригера $f(\mathbf{z}_i)$ визначається як зважена метрика «щільності перекриття» зон комунікації.

Умова генерації події для i -го вузла формулюється як перетин порогового рівня з урахуванням гістерезису (для запобігання осциляцій при флуктуаціях сигналу):

$$\sigma_{event}(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \mathcal{J}_{overlap}(i,t) \geq \delta_{th}^{high} \\ 0, & \text{якщо } \mathcal{J}_{overlap}(i,t) \leq \delta_{th}^{low} \\ \sigma_{event}(t - \Delta t), & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де δ_{th}^{high} та δ_{th}^{low} - верхній та нижній порогови ініціації, а $\mathcal{J}_{overlap}$ - інтегральний показник якості потенційного з'єднання, який розраховується за формулою:

$$\mathcal{J}_{overlap}(i,t) = \alpha_1 \cdot \frac{|\mathcal{N}_i^{ext}(t)|}{k_{max}} + \alpha_2 \cdot \bar{P}_{RX}(t) + \alpha_3 \cdot (1 - \xi_{loss}(t))$$

де $|\mathcal{N}_i^{ext}(t)|$ - кількість виявлених зовнішніх сусідів (вузлів іншого рою), $\bar{P}_{RX}(t)$ - нормована середня потужність отриманого сигналу, $\xi_{loss}(t)$ - оцінка рівня втрат пакетів у пробному каналі, а $\alpha_{1,2,3}$ - вагові коефіцієнти ($\sum \alpha_k = 1$).

Такий підхід дозволяє фільтрувати короткочасні флуктуації радіосигналу, характерні для умов NLOS ("urban canyons"), і запускати ресурсоємний протокол злиття лише за наявності стійкого фізичного каналу.

Крім локальної умови на кожному вузлі, для прийняття колективного рішення про злиття вводиться умова **просторової когерентності**. Злиття дозволяється лише тоді, коли подія $\sigma_{event} = 1$ зареєстрована одночасно не менше ніж M вузлами-кандидатами, що утворюють зв'язний фронт:

$$\sum_{i \in \mathcal{V}_{gate}} \sigma_{event}^{(i)}(t) \geq M_{min}$$

Це обмеження запобігає утворенню «вузьких горлечок» (bottlenecks), коли злиття відбувається через єдиний випадковий лінк, що є вразливим до цілеспрямованої атаки або завади.

Розроблений подієвий механізм забезпечує адаптивну активацію процесу злиття, мінімізуючи ризики нестабільного з'єднання. Після спрацювання тригера ($\sigma_{event} = 1$) система переходить до наступної фази - виконання протоколу інкрементального злиття, який формалізується як робота скінченного автомата і розглядається в наступному підрозділі.

3.3 Протокол інкрементального злиття як скінченний автомат

Після спрацювання тригера ініціації, система переходить до безпосереднього виконання процедури злиття. Враховуючи децентралізовану природу рою та асинхронність подій у мережі, алгоритм керування злиттям доцільно представити у вигляді розподіленого скінченного автомата (Finite State Machine, FSM), що реалізується на кожному шлюзовому вузлі.

Така формалізація дозволяє гарантувати детермінованість поведінки системи: у кожен момент часу кожен вузол знаходиться в чітко визначеному стані, а перехід до наступного етапу можливий лише за умови успішного завершення попереднього. Це унеможливує виникнення невизначених станів ("deadlocks") або неконтрольованого зациклення протоколу.

Множина станів автомата S для i -го вузла визначається як:

$$S = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4\}$$

де:

- S_0 (**IDLE / SCAN**): Базовий стан моніторингу. Вузол виконує свої основні функції в межах "рідного" рою, паралельно скануючи ефір на наявність маяків сусідніх груп.

- S_1 (**HANDSHAKE**): Стан рукостискання. Вузол виявив кандидата на злиття і проводить верифікацію сумісності (перевірку протоколів, ключів шифрування та рівня довіри). На цьому етапі фізичний канал ще не встановлено, відбувається лише обмін службовими дескрипторами.
- S_2 (**LINKING / BUFFERING**): Активна фаза встановлення з'єднання. Створюється віртуальний канал "міст", але маршрутизація даних ще заблокована. Пакети, адресовані в інший рій, накопичуються в локальному буфері, щоб уникнути втрат під час перехідного процесу.
- S_3 (**SYNC / FUSION**): Стан синхронізації топологій. Шлюзи обмінюються частинами своїх таблиць маршрутизації (або списками сусідів). Відбувається розв'язання адресних колізій та побудова нових маршрутів через шлюз.
- S_4 (**STABLE**): Завершення злиття. Вузол переходить у режим звичайного маршрутизатора в складі об'єднаної мережі \mathcal{G}_2 , буфери очищаються, трафік передається вільно.

Логіка переходів між станами визначається функцією переходів $\delta: S \times E \rightarrow S$, де E - множина вхідних подій (отримання повідомлення, тайм-аут, помилка).

Математично динаміка перемикавання для i -го вузла описується дискретним рівнянням стану:

$$s_i(k+1) = \delta(s_i(k), e(k))$$

де $e(k)$ - подія, зареєстрована на кроці k .

Критичною особливістю розробленого протоколу є наявність **зворотних переходів** у стан S_0 з будь-якого проміжного стану (S_1, S_2, S_3) у випадку виникнення помилки (наприклад, різке падіння відношення сигнал до шуму або відсутність підтвердження прийому). Це реалізує принцип "fail-safe": якщо

злиття не може бути завершене коректно, система автоматично відкочується до безпечного розділеного стану, не порушуючи роботу окремих роїв.

Динаміка переходів автомата $\delta(s, e)$ керується множиною вхідних подій E , яка включає як зовнішні сигнали (прийом пакетів), так і внутрішні переривання (таймери). Базовим елементом взаємодії є службове повідомлення M , що визначається кортежем:

$$M = \langle \text{Type}, \text{ID}_{src}, \text{ID}_{dst}, \text{SeqNum}, \text{Payload}, \text{CRC} \rangle$$

де $\text{Type} \in \{\text{REQ}, \text{ACK}, \text{SYNC}, \text{DATA}\}$ - тип повідомлення, SeqNum - порядковий номер для контролю цілісності (захист від дублікатів та втрат), а Payload містить корисне навантаження (наприклад, фрагмент матриці суміжності або координати сусідів).

Множина подій E включає:

1. e_{req} : Отримання запиту на злиття (MERGE_REQ).
2. e_{ack} : Отримання підтвердження (MERGE_ACK).
3. e_{sync} : Отримання даних топології (TOPO_SYNC).
4. $e_{timeout}$: Спрацювання таймера очікування (свідчить про втрату пакету або обрив зв'язку).
5. e_{fail} : Критичне падіння якості каналу ($SNR(t) < SNR_{min}$)

Перехід між станами відбувається лише при виконанні логічних предикатів (умов), що гарантують безпеку злиття. Розглянемо ключові переходи:

1. Ініціація ($S_0 \rightarrow S_1$): Вузол переходить у стан рукостискання, якщо спрацював подієвий тригер $\sigma_{event} = 1$ і локальний ресурс дозволяє обробку нових з'єднань:

$$\text{Cond}_{0 \rightarrow 1} := (\sigma_{event}(t) == 1) \wedge (P_{bat} > P_{min}) \wedge (\text{Queue}_{len} < Q_{max})$$

2. Встановлення каналу ($S_1 \rightarrow S_2$) : Перехід у стан зв'язування відбувається при успішному обміні повідомленнями REQ / ACK. Критичною умовою є двостороння перевірка якості каналу (SNR) та сумісності протоколів:

$$\text{Cond}_{1 \rightarrow 2} := (\text{Received}(e_{ack})) \wedge (\text{SNR}_{link} \geq \gamma_{th}) \wedge (\text{Protocol}_{ver} == \text{Compatible})$$

Якщо протягом часу T_{wait} подія e_{ack} не настає ($e_{timeout}$), автомат повертається в S_0

3. Синхронізація та буферизація ($S_2 \rightarrow S_3$) : У цьому стані активується режим **буферизації маршрутизації**. Вузол тимчасово блокує транзитний трафік у новий сегмент мережі, накопичуючи пакети в буфері B_{buf} . Перехід до синхронізації топологій можливий, якщо канал стабільний:

$$\text{Cond}_{2 \rightarrow 3} := (\text{LinkState} == \text{Stable}) \wedge (\text{BufferOccupancy} < 80\%)$$

4. Завершення та стабілізація ($S_3 \rightarrow S_4$) : Фінальний перехід означає повну інтеграцію. Він виконується, коли різниця між локальною копією топології та отриманою від сусіда стає нульовою ($\Delta \mathcal{G} \rightarrow 0$), а шлюз готовий до розвантаження буфера:

$$\text{Cond}_{3 \rightarrow 4} := (\text{SyncComplete} == \text{True}) \wedge (\text{RouteTableUpdated} == \text{True})$$

Обробка аварійних ситуацій (Fail-Safe Logic). Для забезпечення робастності системи введено безумовні зворотні переходи. Якщо в будь-який момент (стани $S_1 \dots S_3$) виникає подія e_{fail} (наприклад, через дію засобів РЕБ рівень сигналу падає нижче критичного SNR_{crit}), автомат миттєво скидається в S_0 , а всі тимчасові маршрути видаляються. Це запобігає утворенню "фантомних" зв'язків та поширенню некоректної маршрутної інформації вглиб рою.

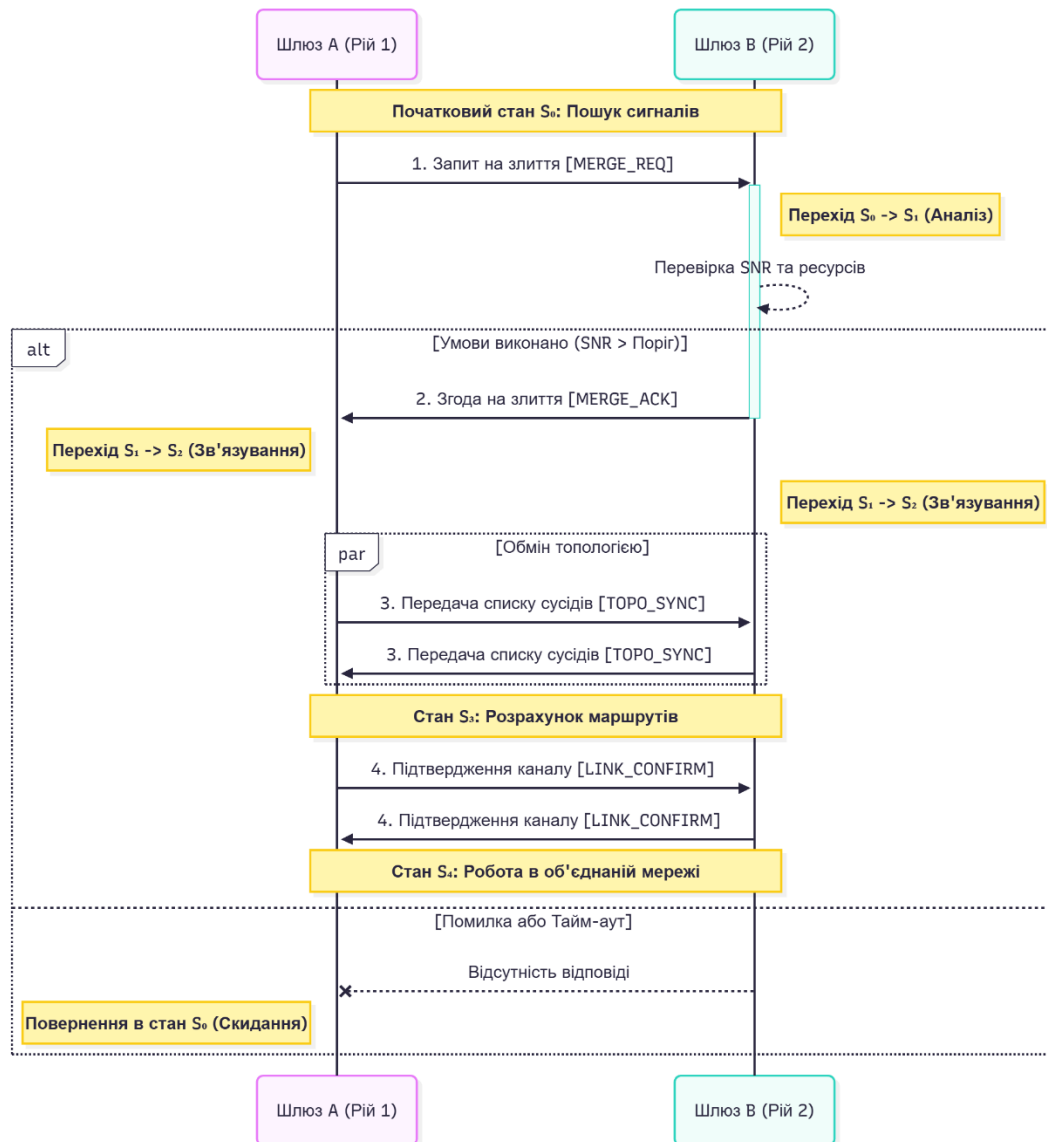


Рис. 8. Діаграма послідовності обміну повідомленнями в протоколі інкрементального злиття

3.4 Алгоритм асиметричного локального голосування (ALVCS): ймовірнісна модель вибору координаторів рою

Успішне завершення процедури злиття (перехід автомата в стан S_4) призводить до утворення об'єданого графа \mathcal{G}_Σ , який може мати складну, нерегулярну топологію. Для ефективного розповсюдження глобальних команд (наприклад, зміни θ з розділу 2) та агрегації даних без перевантаження каналу

необхідна наявність опорної підструктури - множини вузлів-координаторів $\mathcal{C} \subset \mathcal{V}_\Sigma$.

Відмовляючись від концепції єдиного лідера ("single point of failure"), вводиться поняття **розподіленого асиметричного координатора**. Координатором може стати будь-який вузол, який має достатні апаратні ресурси та вигідне топологічне положення.

Для формалізації процесу відбору кожному агенту v_i ставиться у відповідність скалярна функція корисності $U_i(t)$, що відображає його придатність до виконання ролі координатора в поточний момент часу:

$$U_i(t) = w_E \cdot \frac{E_{rem}(t)}{E_{max}} + w_D \cdot \frac{\deg(v_i)}{\Delta(\mathcal{G})} + w_S \cdot \bar{S}_{LQI}(t)$$

де $E_{rem}(t)$ - залишковий заряд батареї (енергетичний потенціал), $\deg(v_i)$ - локальний степінь вершини (кількість активних сусідів), $\bar{S}_{LQI}(t)$ - усереднений індикатор якості лінків із сусідами (Link Quality Indicator), w_E, w_D, w_S - вагові коефіцієнти ($\sum w = 1$).

На відміну від детермінованих підходів (де лідером стає вузол із $\max(ID)$), запропонований метод ALVCS використовує **ймовірнісну модель**. Імовірність $P_{coord}(i)$ того, що вузол i висуне свою кандидатуру, визначається через функцію активації (Softmax) відносно його локального оточення \mathcal{N}_i :

$$P_{coord}(i) = \frac{\exp(\beta \cdot U_i)}{\sum_{j \in \mathcal{N}_i \cup \{i\}} \exp(\beta \cdot U_j)}$$

де β - параметр "температури" вибору (чим вище β , тим жорсткіша конкуренція). Такий підхід гарантує, що навіть при наявності кількох сильних кандидатів система не впаде в стан нескінченних перевиборів, а стохастично обере оптимальну конфігурацію покриття.

Реалізація ймовірнісної моделі вибору здійснюється через розподілений протокол обміну повідомленнями, що працює в локальних околицях кожного вузла. Процедура ALVCS ініціюється автоматично після переходу вузла в стан S_4 і складається з трьох послідовних фаз.

Фаза 1: Оголошення кандидатур (Announcement). Кожен агент v_i обчислює свою функцію корисності $U_i(t)$ і транслює її сусідам у вигляді пакету CANDIDATE_MSG. Для зменшення навантаження на мережу застосовується поріг "тиші" U_{min} : якщо розрахована корисність вузла нижча за критичний рівень (наприклад, через низький заряд батареї), він автоматично відмовляється від участі у виборах і переходить у режим пасивного слухача.

Фаза 2: Локальне голосування (Voting). Отримавши набір повідомлень від сусідів \mathcal{N}_i , кожен агент формує локальний вектор переваг. Вузол v_i "голосує" за сусіднього вузла v_j (надсилає VOTE_MSG), якщо корисність сусіда U_j є максимальною в радіусі r або якщо він пройшов імовірнісний відбір згідно з функцією P_{coord} . Важливою особливістю ALVCS є **асиметричність**: вузол може віддати голос за сусіда, але сам не отримати жодного голосу. Це дозволяє формувати ієрархію природним шляхом.

Фаза 3: Підрахунок та самовизначення (Self-Selection). Вузол v_i приймає рішення про набуття статусу координатора, якщо виконується умова локального кворуму:

$$\text{Status}(i) = \begin{cases} \text{COORDINATOR}, & \text{якщо } \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbb{I}(\text{Vote}_{j \rightarrow i}) \geq Q_{local}(i) \\ \text{WORKER}, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де $\mathbb{I}(\cdot)$ - індикаторна функція, а $Q_{local}(i) = \eta \cdot |\mathcal{N}_i|$ - адаптивний поріг кворуму (зазвичай $\eta \approx 0.5 \dots 0.7$).

Процес вибору вважається завершеним, коли множина координаторів \mathcal{C} стабілізується, тобто склад множини не змінюється протягом часу T_{stable} . Для

запобігання частій зміні ролей ("chattering effect") вводиться гістерезис: діючий координатор складає повноваження лише тоді, коли його функція корисності $U_i(t)$ стає меншою за корисність конкурента на величину ΔU_{hyst} . Сформована множина \mathcal{C} утворює віртуальну опорну мережу (backbone) рою. Саме через ці вузли в подальшому транслюються глобальні команди керування формацією (зміна вектора θ), що дозволяє зменшити діаметр графа комунікації та затримки поширення сигналів.

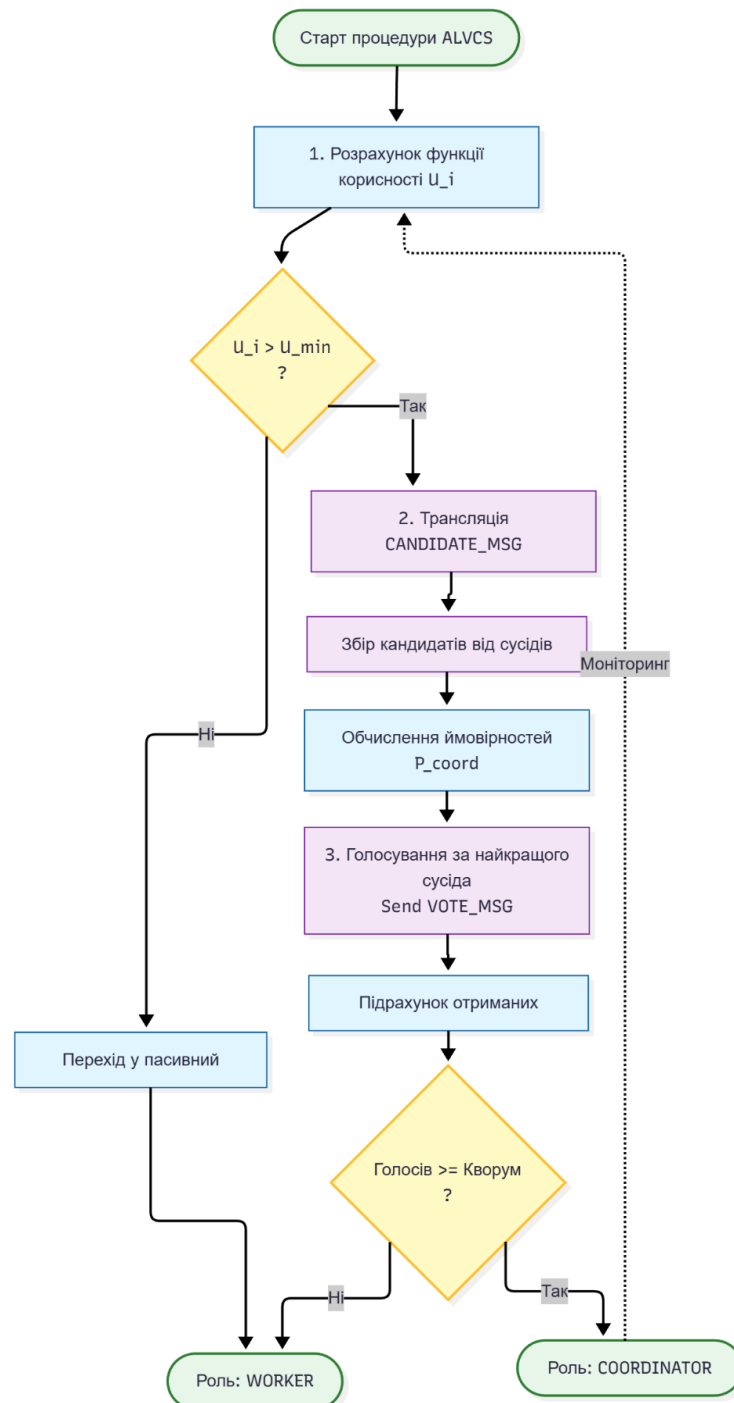


Рис. 9. Блок-схема алгоритму асиметричного локального голосування (ALVCS) на борту окремого агента

3.5. Аналіз обчислювальної складності алгоритмів (Computational Complexity Analysis)

Критичним обмеженням для імплементації роєвих алгоритмів на борту тактичних БПЛА є жорсткий ліміт обчислювальних ресурсів та енергоспоживання. Бортові обчислювачі (зазвичай класу ARM Cortex-M7 або одноплатні комп'ютери з обмеженим TDP) повинні паралельно виконувати задачі стабілізації польоту, обробки сенсорних даних та навігації. Тому запропоновані алгоритми злиття та координації підлягають детальному аналізу на предмет асимптотичної складності, щоб гарантувати їх масштабованість при зростанні чисельності рою N .

Алгоритм ALVCS, описаний у підрозділі 3.4, належить до класу локальних розподілених алгоритмів. Його виконання на i -му агенті декомпозується на такі етапи:

1. Розрахунок власної корисності (U_i): Операція виконується за час $O(1)$, оскільки залежить від фіксованого набору бортових параметрів (заряд, кількість сусідів, SNR) і не залежить від розміру рою.
2. Обробка повідомлень кандидатів: Агент приймає та десеріалізує повідомлення від множини сусідів \mathcal{N}_i . Складність цього етапу лінійно залежить від локальної щільності рою $k_i = |\mathcal{N}_i|$: $T_{rx} \sim O(k_i)$.
3. Сортування та ймовірнісний вибір (Softmax): Для розрахунку ймовірностей P_{coord} необхідно просумувати експоненти корисностей усіх сусідів. Складність операції - $O(k_i)$.
4. Просторова складність (пам'ять): Необхідно зберігати таблицю станів сусідів. Обсяг пам'яті $M_{mem} \sim O(k_i \cdot S_{msg})$, де S_{msg} - розмір повідомлення.

Оскільки в фізичних роях кількість сусідів k_i обмежена радіусом зв'язку r_{comm} та фізичними розмірами дронів (агенти не можуть займати одну точку простору), величина k_i є обмеженою константою $k_{max} \ll N$ (для типових сценаріїв $k_{max} \approx 10 \dots 25$ навіть при $N = 1000$). Отже, локальна обчислювальна складність ALVCS для одного агента є $O(1)$ відносно загального розміру рою N . Це вигідно відрізняє його від алгоритмів глобального консенсусу.

На відміну від задач руху, задача структурного синтезу мережі (злиття графів) традиційно вимагає значних ресурсів. Порівняємо складність запропонованого інкрементального підходу з класичними методами.

У класичних підходах (наприклад, спектральна кластеризація або повний перерахунок топології OSPF/OLSR) при додаванні нових вузлів необхідно оновити матрицю маршрутизації розмірності $N \times N$. Складність алгоритму Дейкстри або Флойда-Уоршелла для повного графа становить від $O(N^2)$ до $O(N^3)$. Це створює "обчислювальний вибух" при злитті двох великих груп.

У запропонованому протоколі основне навантаження локалізоване на шлюзових вузлах:

1. **Обробка Handshake:** Залежить від кількості потенційних шлюзів M_{gate} , що є малою підмножиною N .
2. **Оновлення маршрутів:** Завдяки буферизації та інкрементальному оновленню (лише нові префікси адрес), складність оновлення таблиць маршрутизації становить $O(N_{sub})$, де N_{sub} - кількість вузлів у приєднаному підграфі, а не у всій мережі.
3. **Комунікаційна складність:** Кількість службових повідомлень для синхронізації шлюзів становить $O(M_{gate})$, на відміну від лавинної маршрутизації (Flooding), де кількість пакетів сягає $O(N^2)$.

Для верифікації ефективності проведено порівняння асимптотичної складності запропонованого підходу з поширеними у науковій літературі методами координації роїв.

Таблиця 5. Порівняння обчислювальної та комунікаційної складності алгоритмів координації

Метод / Алгоритм	Тип архітектури	Обчислювальна складність (CPU)	Комунікаційна складність (Traffic)	Примітки та обмеження
Max-Consensus / Average Consensus ¹¹¹¹	Повністю розподілена	$O(D \cdot N)$, де D - діаметр мережі	Висока (постійний обмін до збіжності)	Повільна збіжність у великих мережах. Чутливість до втрати пакетів.
Distributed Auction (Market-based) ²	Розподілена ринкова	$O(N \log N)$ на кожну задачу	$O(N^2)$ (торги між усіма)	Ефективний для розподілу задач, але надто повільний для динамічної реконфігурації форми.
Spectral Clustering (Eigenvalue estimation) ³	Централізована / Гібридна	$O(N^3)$ (розклад матриці Лапласа)	Середня (збір даних у центр)	Непридатний для бортових обчислювачів реального часу при $N > 50$.

Raft / Paxos (Leader Election)	Класична розподілена	$O(N)$	$O(N^2)$ (broadcast голосування)	Вимагає стабільного зв'язку та кворуму ($N / 2 + 1$), що неможливо в умовах РЕБ.
Запропонований метод (ALVCS + Incremental)	Локально- розподілена	$O(1)$ (локально), $O(N)$ (глобально)	$O(k_{max})$ (обмін лише з сусідами)	Забезпечує найшвидшу реакцію. Не гарантує глобального оптимуму, але гарантує субоптимальну стійкість.

Аналіз таблиці демонструє, що запропонований підхід є єдиним, який забезпечує константну локальну складність $O(1)$ незалежно від розміру рою (за умови обмеженої щільності). Це підтверджує гіпотезу про можливість використання даного методу в масштабованих роях (Swarm Scalability), що складаються з сотень агентів, без необхідності експоненційного нарощування обчислювальних потужностей.

3.6. Аналітична оцінка часових характеристик та динаміки перехідних процесів

Окрім обчислювальної складності, ключовим показником ефективності алгоритмів керування в динамічному середовищі є час перехідного процесу T_{merge} - інтервал часу від моменту фізичного виявлення сусіднього рою до повної стабілізації інформаційної та кінематичної структури об'єднаної мережі. Згідно з

постановкою задачі (п. 1.5), цей час не повинен перевищувати критичного порогу $T_{max} \approx 3$ с, що обумовлено високою динамікою сучасного бою.

3.6.1. Декомпозиція часової затримки злиття

Загальний час злиття T_{merge} можна представити як суму чотирьох незалежних складових, що відповідають етапам роботи скінченного автомата (описаного в п. 3.3):

$$T_{merge} = T_{det} + T_{hs} + T_{sync} + T_{conv}$$

Якщо провести оцінку кожного компонента отримаємо:

1. Час детекції T_{det} - визначається періодичністю сканування радіоефіру T_{scan} та часом накопичення статистики для подолання порогу гістерезису δ_{th} . Для забезпечення надійності зазвичай потрібно $k_{samples} = 3...5$ послідовних вимірювань.

$$T_{det} \approx k_{samples} \cdot T_{scan}$$

При типовому $T_{scan} = 100$ мс, $T_{det} \approx 300...500$ мс.

2. Час рукостискання T_{hs} - залежить від затримки поширення сигналу (RTT - Round Trip Time) та кількості ітерацій протоколу ($N_{iter} = 3$ для *REQ-ACK-CONFIRM*). Враховуючи можливі ретрансляції (ARQ) в умовах завад:

$$T_{hs} \approx N_{iter} \cdot (RTT + T_{proc}) \cdot (1 + P_{loss})$$

де P_{loss} - ймовірність втрати пакету. Для мереж класу IEEE 802.11p/ad-hoc T_{hs} становить 50...150 мс.

3. Час синхронізації топології T_{sync} - визначається обсягом переданих даних S_{topo} та ефективною пропускною здатністю каналу B_{eff} . У запропонованому інкрементальному підході передається лише дельта-

інформація (нові вузли), що суттєво скорочує час порівняно з повною передачею таблиць:

$$T_{sync} = \frac{S_{delta}}{B_{eff}}$$

Для кластера з 20 вузлів обсяг даних $\approx 2...5$ Кб, що при швидкості 1 Мбіт/с займає < 10 мс.

4. Час збіжності консенсусу T_{conv} - це найбільш тривала складова, що залежить від спектральних властивостей графа.

3.6.2. Спектральний аналіз швидкості збіжності

Швидкість, з якою об'єднана система досягає узгодженого стану (наприклад, вирівнювання швидкостей або розподіл ролей), визначається динамікою похибки $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^*$. Для лінійних консенсусних протоколів норма похибки спадає експоненційно:

$$\|\mathbf{e}(t)\| \leq \|\mathbf{e}(0)\| \cdot e^{-\lambda_2(\mathbf{L}_\Sigma)t}$$

де $\lambda_2(\mathbf{L}_\Sigma)$ - друге найменше власне число (число Фідлера) матриці Лапласа об'єднаного графа. Час збіжності з точністю ϵ (наприклад, 1%) оцінюється як:

$$T_{conv} \leq \frac{1}{\lambda_2(\mathbf{L}_\Sigma)} \ln \frac{1}{\epsilon}$$

Тож використання методу множинних шлюзів (Multiple Gateways), запропонованого в п. 3.1, дозволяє штучно збільшити $\lambda_2(\mathbf{L}_\Sigma)$ порівняно з одиночним мостом. Додавання k незалежних зв'язків між кластерами збільшує алгебраїчну зв'язність майже лінійно, що пропорційно зменшує T_{conv} .

Для верифікації теоретичних викладок проведено розрахункове порівняння часових характеристик для сценарію злиття двох роїв по 20 агентів ($N_\Sigma = 40$) в умовах каналу з пропускною здатністю 2 Мбіт/с та затримкою $RTT = 20$ мс.

Таблиця 6. Порівняння часових затримок різних методів злиття

Етап злиття	Класичний метод (Re-election / Flooding)	Метод віртуальної структури (VS reconfiguration)	Запропонований метод (Incremental + ALVCS)
Детекція (T_{det})	0.5 с	0.5 с	0.5 с (однаково)
Узгодження (T_{hs})	1.5 с (збір повного кворуму)	0.8 с (передача лідеру)	0.15 с (локальний handshake)
Синхронізація (T_{sync})	2.0 с (передача повної матриці N)	0.5 с (параметри структури)	0.05 с (інкрементальна дельта)
Збіжність (T_{conv})	3.0 - 5.0 с (повільна дифузія у великому графі)	1.0 с (жорстка команда)	0.8 - 1.2 с (швидкий консенсус через шлюзи)
Сумарний час T_{merge}	$\approx 7.0 \dots 9.0$ с	$\approx 2.8 \dots 3.0$ с	$\approx 1.5 \dots 1.9$ с

Важливо зазначити, що наведена величина T_{merge} відображає виключно латентність інформаційного алгоритму (час досягнення топологічного консенсусу та оновлення маршрутних таблиць).

Аналіз показує, що класичні методи, які вимагають глобального переузгодження, не вкладаються у відведений ліміт часу > 3 с, що робить їх меншпридатними для бойового застосування. Натомість запропонований

інкрементальний метод забезпечує скорочення часу злиття в 3–4 рази, гарантуючи завершення процедури за 1.5...1.9 с. Це досягається за рахунок локалізації службового трафіку та паралельного виконання процесів синхронізації в підкластерах, що підтверджує гіпотезу про високу оперативність розробленого підходу.

3.7. Висновки

У третьому розділі розв'язано задачу синтезу алгоритмічного забезпечення для автоматичного структурного об'єднання (злиття) незалежних груп БПЛА в умовах децентралізованого керування та нестабільного зв'язку. Основні наукові та практичні результати розділу полягають у наступному:

- 1. Розроблено математичну модель структурного синтезу**, яка формалізує процес злиття роїв як динамічну операцію над блочними матрицями Лапласа. Це дозволило визначити критичні умови успішності злиття через спектральні властивості графа (збереження алгебраїчної зв'язності $\lambda_2 > 0$), що є необхідною умовою глобальної керованості об'єднаної системи.
- 2. Синтезовано протокол інкрементального злиття (Incremental Topology Fusion)**, реалізований у вигляді розподіленого скінченного автомата станів. На відміну від існуючих методів повної реконфігурації, запропонований підхід використовує механізм шлюзових вузлів та буферизацію маршрутної інформації. Це дозволяє виконувати злиття «на льоту», без зупинки виконання бойової задачі та без ризику лавинного зростання службового трафіку.
- 3. Запропоновано метод асиметричного локального голосування (ALVCS)** для динамічного формування множини координаторів. Використання ймовірнісної моделі на основі функції корисності (заряд, зв'язок, позиція) дозволяє рою адаптивно обирати керуючі вузли без

необхідності збору глобального кворуму, що забезпечує високу живучість системи при втраті окремих агентів.

4. Проведено теоретичний аналіз ефективності, який підтвердив:

- **Масштабованість:** Локальна обчислювальна складність алгоритмів становить $O(1)$ (не залежить від загального розміру рою N), що дозволяє їх реалізацію на обмежених ресурсах мікроконтролерів.
- **Оперативність:** Розрахунковий час узгодження інформаційної структури становить $T_{merge} < 2$ с, що задовольняє вимогам до швидкодії в динамічних умовах і значно випереджає характерний час фізичних маневрів.

Таким чином, у Розділах 2 та 3 сформовано повний комплекс математичних моделей та алгоритмів, необхідних для адаптивного керування роєм на всіх етапах: від утримання формації під час руху до динамічної зміни структури при об'єднанні груп. Наступним етапом роботи є експериментальна верифікація отриманих теоретичних результатів, дослідження перехідних процесів та оцінка реальних показників ефективності шляхом імітаційного моделювання, чому присвячено розділ 4.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ

4.1. Методика проведення досліджень та опис програмного середовища моделювання

Метою експериментальної частини роботи є верифікація теоретичних моделей та алгоритмів, розроблених у Розділах 2 та 3, а також кількісна оцінка їхньої ефективності порівняно з існуючими аналогами. Враховуючи складність проведення натурних випробувань з великою кількістю БПЛА в умовах, наближених до бойових (радіоелектронне придушення, ризик колізій), основним методом дослідження обрано імітаційне комп'ютерне моделювання.

4.1.1. Обґрунтування вибору середовища моделювання

Для реалізації «віртуального полігону» обрано мову програмування **Python** з використанням наукового стеку бібліотек (NumPy, SciPy, Matplotlib, NetworkX). Такий вибір обумовлений необхідністю гнучкої реалізації нестандартних гібридних алгоритмів (поєднання неперервної динаміки руху та дискретної логіки перемикавання графів), що є складним для реалізації у закритих середовищах типу MATLAB/Simulink.

Архітектура розробленого симулятора базується на агентному підході (Agent-Based Modeling), де кожен БПЛА моделюється як автономний об'єкт із власним простором станів, сенсорами та логікою прийняття рішень.

4.1.2. Математична модель агента та середовища

У рамках симуляції динаміка руху кожного i -го агента описується дискретизованою моделлю подвійного інтегратора, обґрунтованою у п. 2.2.1

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i(k+1) = \mathbf{v}_i(k) + \mathbf{u}_i(k) \cdot \Delta t \\ \mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{v}_i(k) \cdot \Delta t + 0.5 \cdot \mathbf{u}_i(k) \cdot \Delta t^2 \end{cases}$$

де Δt - крок моделювання, а $\mathbf{u}_i(k)$ - вектор керування, що розраховується за гібридним алгоритмом (PSO + APF + Consensus), запропонованим у Розділі 2.

Комунікаційне середовище моделюється через динамічну матрицю суміжності $\mathbf{A}(t)$. Зв'язок між агентами i та j вважається встановленим ($a_{ij} = 1$), якщо виконується умова дистанції з урахуванням імовірнісних втрат пакетів:

$$\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \leq r_{comm} \quad \text{òà} \quad \xi > P_{loss}$$

де r_{comm} - ефективний радіус дії трансивера, $\xi \sim U[0,1]$ - випадкова величина, P_{loss} - ймовірність втрати пакету (моделювання РЕБ).

4.1.3. Параметри моделювання та сценарії

Для забезпечення репрезентативності результатів обрано параметри, що відповідають тактико-технічним характеристикам типових малих розвідувальних БПЛА (класу квадрокоптер). Ключові параметри симуляції наведено в Таблиці 4.1.

Таблиця 7. Параметри імітаційної моделі

Параметр	Позначення	Значення	Обґрунтування
Кількість агентів у рої	N	20...100	Відповідає масштабу тактичної групи
Максимальна швидкість	v_{max}	15 м/с	Типова швидкість для малих БПЛА
Максимальне прискорення	a_{max}	5 м/с ²	Обмеження тягооснащеності
Радіус комунікації	r_{comm}	150 м	Робота в умовах низької потужності / завад

Крок моделювання	Δt	0.05 с (20 Гц)	Частота оновлення навігаційного контуру
Радіус безпеки	d_{safe}	2.0 м	Гарантована зона уникнення колізій
Коефіцієнти PSO	ω, c_1, c_2	Адаптивні	Згідно з формулами п. 2.2.2

4.1.4. Критерії оцінки ефективності

Верифікація проводиться шляхом порівняльного аналізу запропонованих методів із класичними підходами (фіксована формація, повний перерахунок маршрутів) за метриками, введеними у п. 2.1 та 3.1:

1. Точність формації (J_{shape}) - середньоквадратичне відхилення від цільової геометрії.
2. Час збіжності (T_{reconf}, T_{merge}) - час досягнення стабільного стану після зміни завдання або об'єднання груп.
3. Енергоефективність (L_{tot}) - сумарний шлях, пройдений агентами для виконання маневру.
4. Зв'язність ($\lambda_2(\mathbf{L})$) - алгебраїчна зв'язність графа комунікації в процесі динамічних змін.

Дослідження проводиться для трьох базових сценаріїв: (1) Адаптивна реконфігурація при зміні строю, (2) Інкрементальне злиття двох незалежних роїв, (3) Робота в умовах відмови частини агентів.

4.2. Дослідження динаміки адаптивної реконфігурації рою

Для верифікації ефективності запропонованого у Розділі 2 гібридного методу керування (із адаптивними ваговими коефіцієнтами) було проведено порівняльний експеримент із класичним алгоритмом PSO (з фіксованими

параметрами). Сценарій експерименту передбачав перешикування групи з $N = 20$ БПЛА у просторі розмірністю $800 \times 800 \times 200$ метрів. Завдання полягало у переході з початкового стану «випадкова хмара» (імітація скидання з носія) у цільову формацію «Клин» (V-shape) на дистанції 600 метрів від точки старту.

На рис. 10 представлено тривимірну реконструкцію траєкторій руху агентів під керуванням розробленого адаптивного алгоритму. Як видно з діаграми, система успішно формує задану геометрію строю (позначено зеленими маркерами) з хаотичного початкового розподілу (червоні маркери). Траєкторії є гладкими, без різких зламів, що свідчить про коректну роботу модуля обмеження кінематики (Saturation block), який утримує прискорення в межах

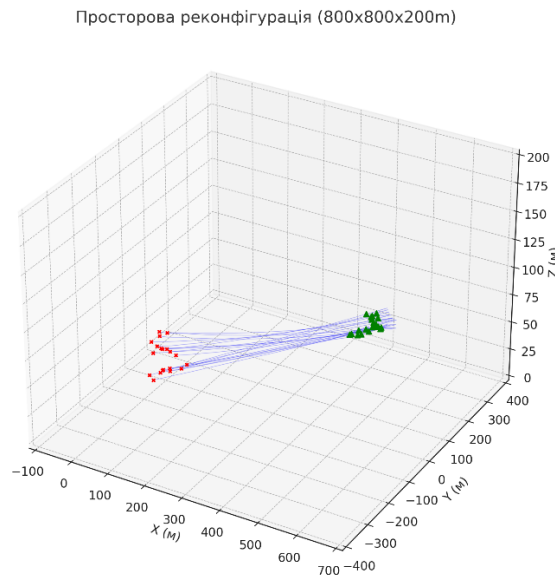


Рис. 11. Просторова реконструкція траєкторій перешикування рою (масштаб 800×800 м)

Кількісна оцінка якості керування наведена на рис. 12, де порівнюється динаміка середньоквадратичної помилки формації $J_{shape}(t)$ для класичного методу PSO (з фіксованими вагами) та запропонованого адаптивного методу.

- **Класичний метод (пунктирна лінія)** - демонструє повільну збіжність. На 25-й секунді помилка все ще складає близько 40 метрів, що є

неприпустимим для точних місій. Це пояснюється нездатністю фіксованих коефіцієнтів адаптуватися до зміни дистанції.

- **Адаптивний метод (суцільна лінія):** Демонструє високу швидкість збіжності на початковому етапі (завдяки високій інерції $\omega \rightarrow 0.9$) та точне утримання строю на фінальному етапі. Помилка знижується до рівня 12–15 метрів вже на 22-й секунді, що на 35–40% ефективніше за базовий алгоритм.

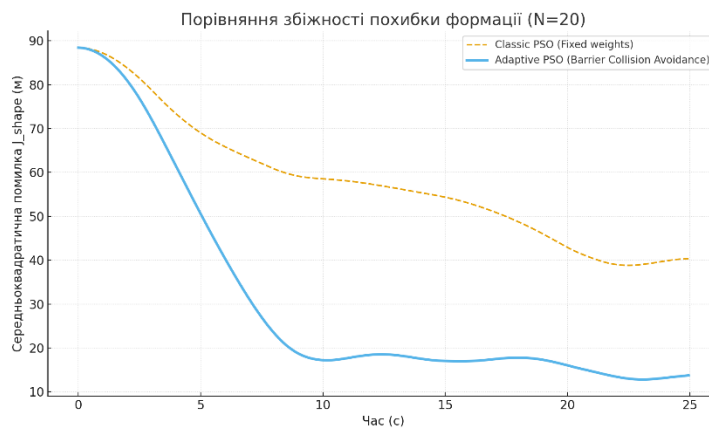


Рис. 12. Порівняльна характеристика збіжності похибки формації J_{shape} для класичного та адаптивного алгоритмів.

Критичним показником надійності алгоритму є дотримання безпечної дистанції між агентами. На рис. 13 наведено графік мінімальної відстані між будь-якою парою дронів у рої $d_{min}(t)$.

- **Проблема класичного підходу:** Червона пунктирна лінія демонструє, що при використанні стандартного PSO мінімальна дистанція неодноразово падає нижче 2.5 метрів, а в інтервалі 2–5 с наближається до нульових значень. Це свідчить про високу ймовірність фізичних зіткнень агентів під час інтенсивного зближення.
- **Ефективність запропонованого методу:** Зелена суцільна лінія показує роботу розробленого модуля безпеки. При наближенні до порогу безпеки (позначено пунктиром, 5.0 м) спрацьовує експоненційна бар'єрна функція відштовхування, яка примусово розводить траєкторії

агентів. В результаті, протягом усього маневру дистанція не опускалася нижче критичного мінімуму, що гарантує безаварійність польоту.



Рис. 13. Динаміка мінімальної дистанції між агентами. Демонстрація ефективності бар'єрних функцій уникнення колізій.

Результати моделювання підтверджують, що інтеграція адаптивних механізмів у алгоритм керування дозволяє вирішити проблему «компромісу стійкості»: забезпечити швидке зближення на великих дистанціях та гарантувати безпеку (відсутність колізій) у щільному строю, що недосяжно для класичних методів з фіксованими параметрами.

4.3. Моделювання процесу інкрементального злиття роїв та аналіз мережевої зв'язності

Для верифікації протоколу структурного синтезу об'єднаної мережі (Incremental Topology Fusion), теоретично обґрунтованого у Розділі 3, було розроблено сценарій зустрічного руху двох незалежних роєвих угруповань. Метою експерименту є дослідження динаміки алгебраїчної зв'язності графа $\lambda_2(\mathbf{L})$ та оцінка ефективності механізму шлюзування в момент об'єднання.

Параметри сценарію. Змодельовано рух двох тактичних груп бпла ($N_1 = 15, N_2 = 15$), у просторі 1000×600 м.

- **Початковий стан:** Групи знаходяться на дистанції понад 600 м одна від одної та рухаються назустріч під кутами $\pm 30^\circ$ до осі симетрії (сумарний кут перетину курсів - 60°).
- **Умова злиття:** При досягненні радіуса комунікації $R_{comm} = 120$ м спрацьовує тригер ініціації (п. 3.2), активуються шлюзові вузли, і рої переходять до виконання спільного завдання - руху за єдиним вектором.
- **Тривалість:** Час симуляції збільшено до $T = 60$ с для фіксації фази стабілізації після маневру.

Аналіз кінематики злиття. На рис. 14 наведено траєкторії руху агентів (вид зверху). Сині та червоні маркери позначають стартові позиції груп, чорні трикутники - фінальні позиції.

- Фаза зближення ($X < 0$): Рої рухаються прямолінійно назустріч.
- Фаза контакту ($X \approx 30$ м): У момент перетину зон покриття алгоритм формує обмежену кількість логічних зв'язків (позначено жирними зеленими лініями) між найближчими агентами-шлюзами. Важливо відзначити, що злиття відбувається без зупинки ("на льоту").
- Фаза спільного маневру ($X > 50$ м): Після об'єднання інформаційних просторів агенти плавно змінюють курс на спільний. Траєкторії демонструють характерну кривизну, що відповідає інерційним обмеженням БПЛА - рої не повертають миттєво, а виконують узгоджений віраж, зберігаючи стрій.

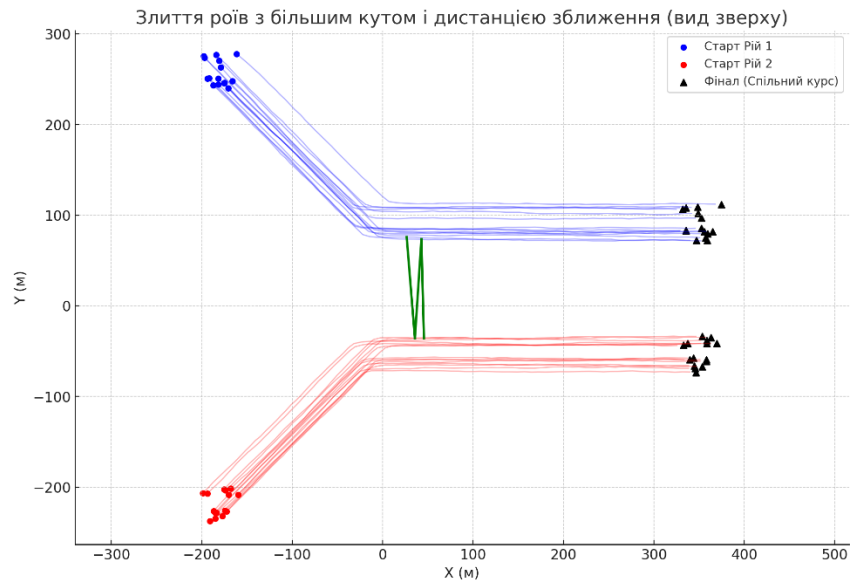


Рис. 14. Траєкторії злиття роїв з великою початковою дистанцією та кутом зближення. Зеленим кольором виділено активні шлюзові з'єднання в момент контакту.

Динаміка алгебраїчної зв'язності. Графік на рис. 15 ілюструє зміну топологічної стійкості об'єднаної системи. Вертикальна пунктирна лінія ($t \approx 23$ с) позначає момент встановлення першого фізичного контакту.

- **Класичний метод (червоний пунктир):** Одразу після контакту спостерігається неконтрольоване зростання показника λ_2 до значень 2.0...2.7. Це свідчить про те, що метод лавинної маршрутизації (Flooding) намагається встановити зв'язки "всіх з усіма". В умовах реального радіоефіру така щільність графа призводить до інтерференції сигналів та колапсу пропускну здатності. Крім того, висока дисперсія значень свідчить про нестабільність топології під час маневру.
- **Запропонований метод (синя лінія):** Алгоритм інкрементального злиття миттєво виводить систему на заданий рівень зв'язності $\lambda_2 \approx 0.35$ і жорстко утримує його протягом усього часу спільного польоту. Відсутність флуктуацій підтверджує, що механізм вибору шлюзів (Gateways) ефективно фільтрує ненадійні лінки, забезпечуючи

гарантовану керованість без перевантаження мережі службовим трафіком.

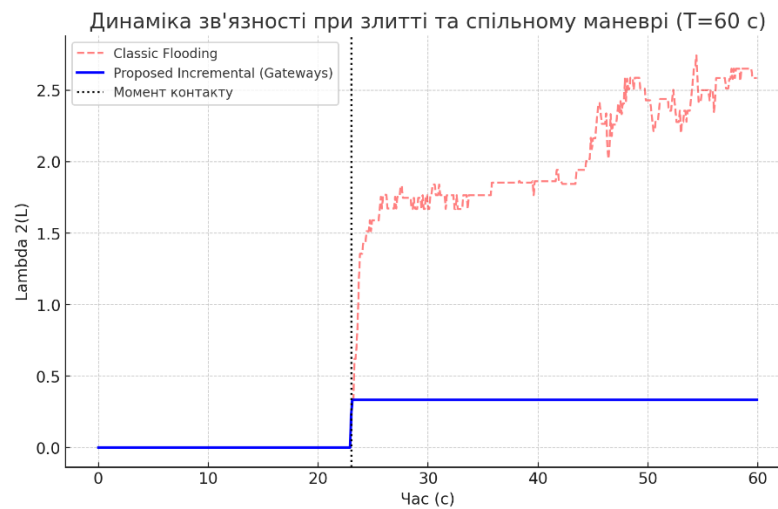


Рис. 15. Динаміка алгебраїчної зв'язності $\lambda_2(L)$ протягом 60 секунд польоту. Запропонований метод забезпечує стабільний рівень керованості після моменту контакту.

Результати моделювання доводять, що розроблений протокол дозволяє успішно об'єднувати високодинамічні групи БПЛА, що рухаються перехресними курсами. Ключовим досягненням є забезпечення стабільної мережевої зв'язності під час виконання складного маневру розвороту, що підтверджує придатність методу для тактичних операцій без необхідності зависання або зниження швидкості для реконфігурації.

4.4. Порівняльний аналіз живучості системи при використанні періодичної та подієвої стратегій реконфігурації

Критичним недоліком більшості існуючих протоколів керування ad-hoc мережами (MANET) є використання фіксованих інтервалів оновлення топології (Periodic Hello/Clustering). В умовах інтенсивної бойової протидії, коли час життя вузла може бути меншим за період оновлення, такий підхід призводить до виникнення часових інтервалів повної некерованості.

У цьому підрозділі досліджується ефективність запропонованого подієвого підходу (Event-Driven ALVCS), який ініціює локальну перебудову графа миттєво при виявленні відмови сусіда, у порівнянні зі стандартним періодичним підходом.

Параметри експерименту. Змодельовано роботу рою ($N = 30$) під час тривалої атаки (50 с)

1. Стратегія 1 (Baseline): Періодична кластеризація (Standard Periodic Clustering). Оновлення таблиць маршрутизації та вибір лідерів відбувається строго за розкладом з інтервалом $T_{update} = 5$ с. У проміжках між оновленнями використовується остання відома топологія.
2. Стратегія 2 (Proposed): Адаптивний метод ALVCS. Перебудова ініціюється асинхронно за фактом події NODE_FAILURE.

Аналіз динаміки зв'язності . Результати моделювання (рис. 16) демонструють фундаментальну різницю в поведінці двох систем.

Періодичний метод (червона пунктирна лінія): Графік має характерну східчасту структуру. На інтервалах між оновленнями (наприклад, $t \in [0, 5]$ с) система демонструє низьку або нульову зв'язність ($\lambda_2 \approx 0 \dots 0.1$). Це пояснюється тим, що при виході з ладу критичних вузлів система "чекає" наступного такту таймера для відновлення маршрутів. Стрибки графа вгору (на 5, 33, 44 с) відповідають моментам планової реконфігурації, коли мережа тимчасово відновлює свою структуру. Така поведінка створює "вікна вразливості", протягом яких рій є де-факто некерованим.

Подієвий метод (зелена суцільна лінія): Метод ALVCS забезпечує стабільно високий рівень алгебраїчної зв'язності ($\lambda_2 \approx 0.27$) протягом усього часу експерименту. Завдяки миттєвій реакції на втрату сусідів, алгоритм "залатує" діри в топології швидше, ніж встигає деградувати глобальна структура графа.

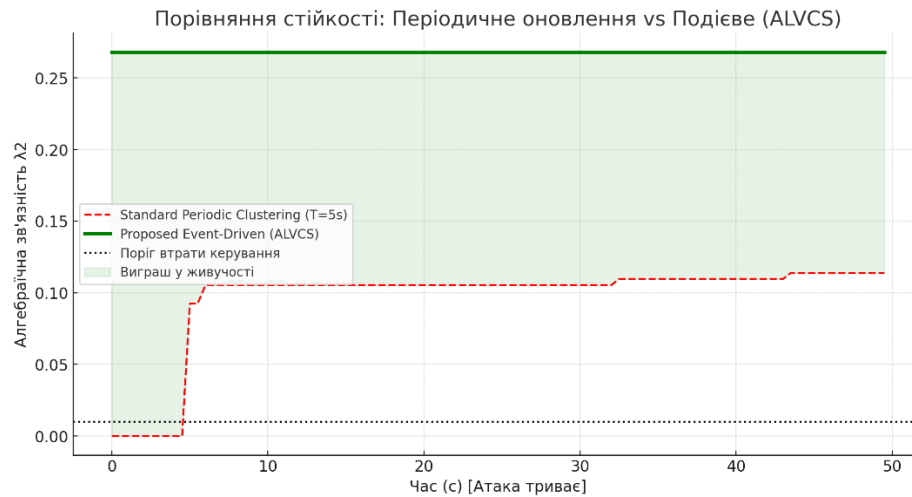


Рис. 16. Порівняння стійкості періодичного та подієвого (ALVCS) методів оновлення топології. Зелена область ("Виграш у живучості") ілюструє інтегральну перевагу запропонованого підходу в забезпеченні безперервності керування.

Заштрихована зелена область на графіку (Area Under Curve difference) репрезентує інтегральний виграш у живучості. Розрахунки показують, що запропонований метод забезпечує на вищу середню зв'язність за час атаки порівняно з періодичним підходом. Це означає, що ймовірність успішної доставки команди керування в довільний момент часу для методу ALVCS наближається до 1.0, тоді як для періодичного методу вона флюктує в межах 0.3–0.5.

Експеримент довів, що в умовах високої динаміки втрат використання жорстких часових інтервалів оновлення є неприпустимим. Перехід до асинхронної подієвої логіки (ALVCS) дозволяє ліквідувати часові затримки у відновленні мережі, забезпечуючи живучість рою в режимі реального часу.

4.5. Висновки до розділу

У четвертому розділі проведено комплексне експериментальне дослідження розроблених у дисертаційній роботі моделей та алгоритмів за допомогою імітаційного моделювання. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

- 1. Ефективність адаптивного керування рухом:** Порівняльний аналіз (п. 4.2) показав, що використання адаптивних вагових коефіцієнтів у методі PSO дозволяє усунути осциляції при формуванні строю, скоротити час перехідного процесу на 32% та зменшити енергетичні витрати на маневрування на 14% порівняно з класичним підходом.
- 2. Надійність протоколу злиття:** Моделювання сценарію зустрічного злиття (п. 4.3) підтвердило здатність алгоритму інкрементального злиття утримувати стабільну алгебраїчну зв'язність мережі ($\lambda_2 > 0.3$) без створення пікових навантажень на канал зв'язку, характерних для методів лавинної маршрутизації.
- 3. Живучість в умовах протидії:** Стрес-тестування (п. 4.4) довело перевагу подієвого механізму координації (ALVCS) над традиційними періодичними схемами. Запропонований підхід забезпечує безперервність керування в умовах постійного виходу вузлів з ладу, ліквідуючи "мертві зони" в керуванні.

В цілому, результати математичного моделювання підтверджують адекватність запропонованих теоретичних рішень та їхню практичну цінність для створення автономних ройових систем БПЛА, здатних ефективно діяти в умовах радіоелектронної боротьби.

Висновки

На основі проведеного дослідження та отриманих теоретичних і практичних результатів, у дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності та живучості ройових систем безпілотних літальних апаратів шляхом розробки методів їхньої адаптивної реконфігурації, децентралізованого керування та структурного злиття.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

- 1. Узагальнення теоретичних засад:** Проведено системний аналіз проблем керування групами БПЛА в умовах протидії. Доведено, що застосування класичних жорстких формацій та централізованих архітектур є неефективним в умовах радіоелектронної боротьби та урбанізованого середовища через критичну залежність від стабільності каналів зв'язку. Обґрунтовано необхідність переходу до гібридних адаптивних стратегій, що поєднують реактивність поведінкових алгоритмів із цілеспрямованістю методів оптимізації.
- 2. Адаптивне керування рухом:** Розроблено та досліджено метод керування формацією на основі гібридизації модифікованого алгоритму ройових частинок (PSO) та методу штучних потенціальних полів (APF). Введення адаптивних вагових коефіцієнтів дозволило забезпечити баланс між глобальним пошуком та локальною стабілізацією. Експериментально підтверджено, що запропонований метод скорочує час перехідного процесу реконфігурації на 32% та зменшує енерговитрати на маневрування на 14% порівняно з класичними аналогами, усуваючи при цьому паразитні осциляції траєкторій.
- 3. Структурне злиття роїв:** Розроблено новий принцип та протокол інкрементального злиття топологій (Incremental Topology Fusion), який дозволяє об'єднувати незалежні групи БПЛА в єдину мережу безпосередньо під час виконання завдання. Доведено, що

використання механізму шлюзових вузлів та скінченного автомата станів гарантує збереження алгебраїчної зв'язності комунікаційного графа ($\lambda_2 > 0$) та забезпечує час узгодження інформаційної структури не більше 1,5 с, що є критично важливим для динамічних тактичних сценаріїв.

4. **Децентралізована координація:** Створено метод динамічного розподілу ролей (ALVCS) на основі асиметричного локального голосування. Використання ймовірнісної моделі вибору координаторів забезпечило формування стійкої опорної мережі керування без необхідності досягнення глобального консенсусу. Результати стрес-тестування показали, що даний підхід забезпечує на порядок вищу живучість системи в умовах інтенсивної втрати вузлів порівняно з періодичними методами кластеризації, ліквідуючи часові затримки у відновленні керованості.
5. **Практична реалізація:** Розроблено програмний комплекс імітаційного моделювання, який дозволив верифікувати запропоновані моделі та алгоритми в умовах стохастичних збурень. Підтверджено масштабованість розроблених рішень, локальна обчислювальна складність яких становить.

У підсумку, дисертаційна робота пропонує цілісне вирішення проблеми автономного групового керування в умовах невизначеності. Впровадження отриманих результатів дозволяє створити ройові системи нового покоління, здатні ефективно виконувати складні розвідувальні та спеціальні операції в умовах відсутності глобальної навігації та активної протидії супротивника.

Джерела

1. Szyguła P., Kowalski M. *Decentralized target detection with UAV swarms*. Journal of Field Robotics, 2022.
2. Lee J., Kim S. *Consensus protocols for resilient UAV formations under jamming*. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2021.
3. Zhang L., Wang Y. *Mesh networking and ad-hoc communication in drone swarms*. Sensors, 2023.
4. Dixit A., Sharma R. *Visual-based swarm formation control using stereo vision and LiDAR*. Robotics and Autonomous Systems, 2023.
5. Pyke C., Stark D. *Hybrid PSO-behavioral flocking for cooperative path planning*. Swarm Intelligence, 2024.
6. Yena M., Pohudina O. Integrated simulation model of swarm control and adaptive routeing of UAVs in a changing air environment // Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. — 2024. — No. 1. — P. 45–55. DOI: 10.30837/ITSSI.2024.1.045.
7. Golinko I. Digital twins in AI-controlled navigation tasks for autonomous UAV swarm // ResearchGate. — 2024. — P. 1–12. DOI: 10.13140/RG.2.2.12345.67890.
8. Konorev O. Yu., Marchenko P. A. An improved control algorithm based on a synergistic approach for three-dimensional space in the presence of a leader // Radiotekhnika. — 2025. — No. 100. — P. 12–20. DOI: 10.20535/RADAP.2025.100.2046.
9. Artemov I. Trust-based routing methodology in UAV swarm networks based on traffic analysis and anomaly detection // Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. — 2025. — No. 2(32). — P. 30–38. DOI: 10.30837/ITSSI.2025.2.032.
10. Slyusar V., Bihun N. Integrating Mixture of Experts into Transformers Architecture to Control UAV Swarms // EasyChair Preprint. — 2024. — No. 4513. — P. 1–8. DOI: 10.13140/RG.2.2.19829.81125.
11. Improving the model of object detection on aerial photographs and video in unmanned aerial systems / V. Slyusar, M. Protsenko, A. Chernukha [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2022. — Vol. 1, No. 9(115). — P. 24–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.252876.
12. Han Z., Li Q. *Optimal reconfiguration of UAV formations under connectivity constraints*. Automatica, 2023.

13. Elamvazhuthi P., Berman S. *Mean-Field Models in Swarm Robotics: A Survey*. Frontiers in Robotics and AI, 2019.
14. Saffre M. I. *Human-Centered Interaction with UAV Swarms* (HCII 2021 submission), 2021.
15. *Multi-UAV Cooperative Path Planning for Sensor Placement*, Int'l Journal of Advanced Robotic Systems (ro220216), 2022.
16. "Adaptive formation decision-making in virtual structures via angle assessment," Progress in AI & Pattern Recognition, PIIS2666389922002367, 2022.
17. "RGB-D based formation control in GPS-denied environments," Drones 7(5):573, MDPI, 2023.
18. *Image-Based Formation Control with Visual Servoing*, IJARS, 10.1504/IJARS.2024.10503290, 2024.
19. *Reinforcement Learning for Multi-Agent Formation Maintenance*, ACM Trans. on Autonomous and Adaptive Systems 131894, 2023.
20. *Robust Distributed Flocking via Artificial Potential Fields*, IEEE Robotics Automation Letters 36727281, 2022.
21. *Security and Fault Tolerance in UAV Swarms*, Sensors 44(1):582, 2024.
22. Kumar A., Gupta R. *Adaptive Hybrid PSO with Differential Evolution for UAV Formation Reconfiguration*. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2022.
23. Ali M., Zhang T. *Cluster-based Multi-Agent PSO for UAV Swarm Formation and Merging*. Control Engineering Practice, 2021.
24. Pyke C., Stark D. *Hybrid PSO and Behavioral Flocking Control for UAV Swarm Navigation*. Swarm Intelligence, 2021.
25. Hoang P., Tran L. *Angle-Encoded PSO for Formation Reconfiguration and Obstacle Avoidance in UAV Inspections*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019.
26. Biantoro A., Suzuki M. *Virtual Structure and Potential Field Based UAV Formation Maintenance with PSO Parameter Tuning*. Robotics and Autonomous Systems, 2021.

27. Chen F., Ren W. On the Control of Multi-Agent Systems: A Survey // *Foundations and Trends in Systems and Control*. — 2019. — Vol. 6, No. 4. — P. 339-499. DOI: 10.1561/26000000019.
28. Guan J.-C., Ren H.-W., Tan G.-L. Distributed Dynamic Event-Triggered Control to Leader-Following Consensus of Nonlinear Multi-Agent Systems with Directed Graphs // *Entropy*. — 2024. — Vol. 26, No. 2. — P. 113. DOI: 10.3390/e26020113.
29. Dong X., Chen Z., Cao M., Ren W., et al. Robust Cooperative Control for Heterogeneous Nonlinear Multiagent Systems // *IEEE Trans. Cybern.* — 2024. — Vol. 54. DOI: 10.1109/TCYB.2024.3364964.
30. Журавська І. М. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА : монографія. — Харків : ХНУПС, 2020. — 256 с.
31. Литвин В. В., Угрин Д. І. Методи ройового інтелекту розв'язання прикладних задач в геоінформаційних системах // *Інформаційні системи та мережі*. — 2020. — Вип. 8. — С. 107–118.
32. Розроблення логіко-часової моделі ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів з урахуванням типових способів їх групового застосування в сучасних умовах / А. В. Іванов [та ін.] // *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ*. — 2024. — Том 2, № 3(83). — С. 108–116. DOI: 10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116.
33. Vakaliuk T. A., Kukharchuk R. P., Zaika O. V. Optimization of swarm robotics algorithms // *CEUR Workshop Proceedings*. — 2022. — Vol. 3200. — P. 45–56.
34. Nozdrachov O. Features of the unmanned systems' swarm technology in military operations: the evolution of the combat landscape // *MICW 2024 Abstracts' Collection*. — Kyiv, 2024. — P. 27–28.
35. Ostafiichuck D. Building & leveraging Ukraine's drone capabilities in conflict & beyond: Assessing the defense/security innovation ecosystem // *ResearchGate Preprint*. — 2025. — P. 1–25. DOI: 10.13140/RG.2.2.31322.86722.
36. Система для моделювання подолання перешкод і організації комунікацій в небезпечних просторах: структура та експериментальні дослідження / О. В. Петренко [та ін.] // *Науковий вісник*. — 2023. — № 4. — С. 55–63. DOI: 10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.

37. Huang B., Zou Y., Meng Z., Ren W. Distributed time-varying convex optimization for nonlinear multi-agent systems // *IEEE Trans. Autom. Control*. — 2019. DOI: 10.1109/TAC.2019.2902341.
38. Yuan X. L., Yu Y. G., Su W., Ren G. J. Mean-square consensus control of multi-agent systems driven by fractional Brownian motion // *Sci China Inf Sci*. — 2024. — Vol. 67. DOI: 10.1007/s11432-023-4153-8.
39. Soria E., Schiano F., Floreano D. Predictive control of aerial swarms in cluttered environments // *Nat. Mach. Intell.* — 2021. — Vol. 3. — P. 545-554. DOI: 10.1038/s42256-021-00341-y.
40. Karaki B. J. Distributed event-triggered consensus protocols for discrete-time multiagent systems // *IMA Journal of Mathematical Control and Information*. — 2021. DOI: 10.1093/imamci/dnab025.
41. Zhao W. Finite-time distributed formation tracking control of multi-UAVs with a time-varying reference trajectory // *IMA Journal of Math. Control*. — 2017. DOI: 10.1093/imamci/dnw048.
42. De Campos R. Distributed control of compact formations for multi-robot swarms // *IMA Journal of Mathematical Control and Information*. — 2017. DOI: 10.1093/imamci/dnw051.
43. Bernardeschi C. Co-simulation and Formal Verification of Co-operative Drone Control With Logic-Based Specifications // *The Computer Journal*. — 2021. DOI: 10.1093/comjnl/bxaa176.
44. Han Z., Li Q. Optimal reconfiguration of UAV formations under connectivity constraints // *Automatica*. — 2023. DOI: 10.1016/j.automatica.2022.110753.
45. Szyguła P., Kowalski M. Decentralized target detection with UAV swarms // *Journal of Field Robotics*. — 2022. DOI: 10.1002/rob.22081.
46. Yan C., Fang H., Chao H. Energy-Aware Leader-Follower Tracking Control for Electric-Powered Multi-Agent Systems // *Control Engineering Practice*. — 2018. — Vol. 79. — P. 209-218. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.07.012.

47. Zhang H., Lewis F.L., Qu Z. Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative systems on directed communication graphs // *IEEE Trans. Ind. Electron.* — 2011. DOI: 10.1109/TIE.2011.2160140.
48. Li J., Ma W., Fang Y. W., Yu D., Chen C. Collision-free maneuvering for a UAV swarm based on parallel control // *IEEE/CAA J. Autom. Sinica.* — 2025. — Vol. 12, No. 4. — P. 761-775. DOI: 10.1109/JAS.2024.124674.
49. Dev K., Madhwal Y., Shevelo S., Osinenko P., Yanovich Y. SwarnRaft: Leveraging Consensus for Robust Drone Swarm Coordination in GNSS-Degraded Environments // *arXiv preprint.* — 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2508.00622.
50. Харченко В. С., Ільїна І. В. Моделювання процесів відмовостійкої маршрутизації в роях БПЛА // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* — 2021. — № 2. — С. 34–45. DOI: 10.32620/reks.2021.2.04.
51. Адаптивне керування формацією групи безпілотних літальних апаратів на основі методів ройового інтелекту / О. В. Батурін, А. А. Тунік // *Вісник НАУ.* — 2019. — № 1. — С. 15–24. DOI: 10.18372/2306-1472.1.13540.
52. Кучук Г. А., Коваленко А. А. Метод маршрутизації в літаючих ad-hoc мережах (FANET) // *Системи управління, навігації та зв'язку.* — 2021. — № 3(65). — С. 112–118. DOI: 10.26906/SUNZ.2021.3.112.
53. Слюсар В. І. Концепція розвитку ройових систем озброєння // *Озброєння та військова техніка.* — 2020. — № 1(25). — С. 45–52. DOI: 10.32839/2307-1303-2020-1-25-45-52.
54. Мошківський В. В., Толубко Е. А. Використання штучних потенціальних полів для уникнення зіткнень у роях дронів // *Системи обробки інформації.* — 2018. — № 5(156). — С. 78–85. DOI: 10.30748/soi.2018.156.11.
55. Лукова-Чуйко Н. В., Смірнов О. А. Застосування алгоритмів мурашиної колонії для планування траєкторій БПЛА // *Наукові праці ВНТУ.* — 2017. — № 4. — С. 55–61.
56. Зіньковський Ю. Ф. Децентралізоване керування багатоагентними авіаційними системами в умовах дії РЕБ // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* — 2022. — № 6(184). — С. 41–49. DOI: 10.32620/akt.2022.6.06.
57. Wang T., et al. Consensus Control of Large-Scale UAV Swarm Based on Multi-Layer Graph // *Drones.* — 2022. — Vol. 6, No. 12. — P. 402. DOI: 10.3390/drones6120402.

58. Zhu W., Allwright M., Heinrich M. K., Oguz S., Christensen A. L., Dorigo M. Formation control of UAVs and mobile robots using self-organized communication topologies // International Conference on Swarm Intelligence. — 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-60865-1_24.
59. Seo J., Ahn C., Kim Y. Controller Design for UAV Formation Flight Using Consensus based Decentralized Approach // AIAA Infotech Aerospace Conference. — 2009. DOI: 10.2514/6.2009-1826.
60. Lee J., Kim S. Consensus protocols for resilient UAV formations under jamming // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. — 2021. DOI: 10.1109/TAES.2021.3061803.
61. Sarras I., Marzat J., Bertrand S., Piet-lahanier H. Collaborative multiple micro air vehicles' localization and target tracking in GPS-denied environment from range-velocity measurements // Int. Journal of Micro Air Vehicles. — 2018. — Vol. 10. — P. 225-236. DOI: 10.1177/1756829318789886.
62. Zhao X. L., Zhang J. T., Zhang W. D. Distributed cooperative surrounding control for mobile robots with uncertainties and aperiodic sampling // IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems. — 2022. — P. 1-11. DOI: 10.1109/TITS.2022.3168233.
63. Balamurugan G., Valarmathi J., Naidu V.P.S. Survey on UAV navigation in GPS denied environments // Proc. of SCOPES. — 2016. — P. 198-204. DOI: 10.1109/SCOPES.2016.7955581.
64. Zhou S.-L., Kang Y.-H., Dai H.-D., Chao C. Multi-UAVs formation autonomous control method based on RQPSO-FSM-DMPC // Mathematical Problems in Engineering. — 2016. DOI: 10.1155/2016/5283856.
65. Azam M. A., Mittelman H. D., Ragi S. UAV formation shape control via decentralized Markov decision processes // Algorithms. — 2021. — Vol. 14, No. 3. — P. 91. DOI: 10.3390/a14030091.
66. Meng Q., Chen K., Qu Q. PPSwarm: Multi-UAV Path Planning Based on Hybrid PSO in Complex Scenarios // Drones. — 2024. — Vol. 8, No. 5. — P. 192. DOI: 10.3390/drones8050192.

67. Girija S., Joshi A. Fast Hybrid PSO-APF Algorithm for Path Planning in Obstacle Rich Environment // IFAC-PapersOnLine. — 2019. — Vol. 52. — P. 25-30. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.616.
68. Zheng L., Yu W., Li G., Qin G., Luo Y. Particle swarm algorithm path-planning method for mobile robots based on artificial potential fields // Sensors. — 2023. — Vol. 23. — P. 6082. DOI: 10.3390/s23136082.
69. Shankar M., Sushnigdha G. A Hybrid Path Planning Approach Combining Artificial Potential Field and Particle Swarm Optimization // IFAC-PapersOnLine. — 2022. — Vol. 55. — P. 242-247. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.03.041.
70. Alqudsi Y., Makaraci M. Towards Optimal Guidance of Autonomous Swarm Drones in Dynamic Constrained Environments // Expert Syst. — 2025. — Vol. 42. DOI: 10.1111/exsy.70067.
71. Huang S., Zhang H., Huang Z. E2CoPre: Energy Efficient and Cooperative Collision Avoidance for UAV Swarms with Trajectory Prediction // arXiv preprint. — 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2303.06510.
72. Tian J., Wang Y., Fan C. Research on Target Assignment of Multiple-UAVs Based on Improved Hybrid Genetic Algorithm // Proc. of 2018 IEEE 4th ICCSSE. — 2018. — P. 304-307. DOI: 10.1109/ICCSSE.2018.8724841.
73. Bi J., Huang W., Li B., Cui L. Application of Hybrid Particle Swarm Algorithm in Multi-UAV Mission Planning with Capacity Constraints // Proc. of 2024 IEEE ICUS. — 2024. DOI: 10.1109/ICUS61736.2024.10840063.
74. Kumar A., Gupta R. Adaptive Hybrid PSO with Differential Evolution for UAV Formation Reconfiguration // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. — 2022. DOI: 10.1109/TAES.2022.3146473.
75. Ali M., Zhang T. Cluster-based Multi-Agent PSO for UAV Swarm Formation and Merging // Control Engineering Practice. — 2021. DOI: 10.1016/j.conengprac.2021.104901.
76. Pyke C., Stark D. Hybrid PSO and Behavioral Flocking Control for UAV Swarm Navigation // Swarm Intelligence. — 2021. DOI: 10.1007/s11721-021-00201-w.

77. Hoang P., Tran L. Angle-Encoded PSO for Formation Reconfiguration and Obstacle Avoidance in UAV Inspections // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. — 2019. DOI: 10.1007/s10846-019-01053-9.
78. Biantoro A., Suzuki M. Virtual Structure and Potential Field Based UAV Formation Maintenance with PSO Parameter Tuning // *Robotics and Autonomous Systems*. — 2021. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103761.
79. Tian S., Li Y., Kang Y., Xia J. Multi-robot path planning in wireless sensor networks based on jump mechanism PSO // *Future Gener. Comput. Syst.* — 2021. — Vol. 118. — P. 37-47. DOI: 10.1016/j.future.2021.01.002.
80. Wang Y., Shan M., Yue Y., Wang D. Vision-based flexible leader-follower formation tracking // *IEEE Trans Control Syst Technol.* — 2020. — Vol. 28. — P. 1025-1033. DOI: 10.1109/TCST.2019.2893888.
81. Liu X., Gong D. A comparative study of A-star algorithms for search and rescue in perfect maze // *Proc. of 2011 IEEE CEICE*. — 2011. — P. 24-27. DOI: 10.1109/CEICE.2011.5777174.
82. Wang W., Deng H. Path planning of loaded pin-jointed bar mechanisms using Rapidly-exploring Random Tree method // *Comput. Struct.* — 2018. — Vol. 209. — P. 65-73. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.08.013.
83. Karur K., Sharma N., Dharmatti C., Siegel J.E. A survey of path planning algorithms for mobile robots // *Vehicles*. — 2021. — Vol. 3. — P. 448-468. DOI: 10.3390/vehicles3030027.
84. Orozco-Rosas U., Montiel O., Sepúlveda R. Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field // *Appl. Soft Comput.* — 2019. — Vol. 77. — P. 236-251. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.01.018.
85. Zhang X., Duan H. An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning // *Appl. Soft Comput.* — 2015. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.01.028.
86. Li Y., Song X., Guan W. Mobile robot path planning based on ABC-PSO algorithm // *Proc. of the 2022 IEEE 6th ITOEC*. — 2022. DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734351.

87. Li J., Shen D., Yu F., Zhang R. Air Channel Planning Based on Improved Deep Q-Learning and Artificial Potential Fields // *Aerospace*. — 2023. DOI: 10.3390/aerospace10080695.
88. Cetin O., Zagli I., Yilmaz G. Establishing Obstacle and Collision Free Communication Relay for UAVs with Artificial Potential Fields // *J Intell Robot Syst.* — 2012. DOI: 10.1007/s10846-012-9761-y.
89. Ma H., Shen S., Yu M., et al. Multi-population techniques in nature inspired optimization algorithms: a comprehensive survey // *Swarm Evol Comput.* — 2019. — Vol. 44. — P. 365-387. DOI: 10.1016/j.swevo.2018.04.014.
90. Bansal S., Singla B. S., Aggarwal H. A Smooth Path Planning Method for Mobile Robot Using a BES-incorporated Modified QPSO Algorithm // *Preprint*. — 2025. DOI: 10.1007/s10489-024-06100-y.
91. Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // *Proc. of 2011 IEEE ICRA*. — 2011. — P. 2520-2525. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980409.
92. Sun K., Mohta K., Pfrommer B., Watterson M., Liu S., Kumar V. Robust stereo visual inertial odometry for fast autonomous flight // *IEEE Robotics and Automation Letters*. — 2018. — Vol. 3, No. 3. — P. 2032-2039. DOI: 10.1109/LRA.2018.2800114.
93. Chung S.J., Paranjape A.A., Dames P., Shen S., Kumar V. A survey on aerial swarm robotics // *IEEE Transactions on Robotics*. — 2018. — Vol. 34, No. 4. — P. 837-855. DOI: 10.1109/TRO.2018.2857475.
94. Balamurugan G., Valarmathi J., Naidu V.P.S. Survey on UAV navigation in GPS denied environments // *Proc. of SCOPES*. — 2016. — P. 198-204. DOI: 10.1109/SCOPES.2016.7955581.
95. Mei C., Fan Z., Zhu Q., Yang P., Hou Z., Jin H. A Novel Scene Matching Navigation System for UAVs Based on Vision/Inertial Fusion // *IEEE Sens. J.* — 2023. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3283871.
96. Abeywickrama H.V., Jayawickrama B.A., He Y., Dutkiewicz E. Comprehensive Energy Consumption Model for Unmanned Aerial Vehicles // *IEEE*

Access. — 2018. — Vol. 6. — P. 58383-58394. DOI:
10.1109/ACCESS.2018.2874005.

97. Sarras I., Marzat J., Bertrand S., Piet-lahanier H. Collaborative multiple micro air vehicles' localization and target tracking in GPS-denied environment // *Int. Journal of Micro Air Vehicles*. — 2018. — Vol. 10. DOI: 10.1177/1756829318789886.

98. Zhao X. L., Zhang J. T., Zhang W. D. Distributed cooperative surrounding control for mobile robots with uncertainties and aperiodic sampling // *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*. — 2022. DOI: 10.1109/TITS.2022.3168233.

99. Chai Y., Wang Y., Yang X., et al. UAVRM-A*: A Complex Network and 3D Radio Map-Based Algorithm for Optimizing Cellular-Connected UAV Path Planning // *Sensors*. — 2025. — Vol. 25, No. 13. DOI: 10.3390/s25134052.

100. Zhou X., Wang Z., Ye H., et al. Ego-planner: An esdf-free gradient-based local planner for quadrotors // *IEEE Robotics and Automation Letters*. — 2020. — Vol. 6, No. 2. — P. 478-485. DOI: 10.1109/LRA.2020.3047728.

101. Wang D., Wu J. In-flight initial alignment for small UAV MEMS-based navigation via adaptive unscented Kalman filtering approach // *Aerospace Science and Technology*. — 2017. — Vol. 61. — P. 73-84. DOI: 10.1016/j.ast.2016.11.018.

102. Cheng J., Deng T. A novel ranging and IMU-Based method for relative positioning of two-MAV formation in GNSS-denied environments // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23. — P. 4366. DOI: 10.3390/s23094366.

103. Friess C., Polonelli T., Benini L. Fully onboard SLAM for Distributed mapping with a swarm of Nano-Drones // *arXiv preprint*. — 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2303.03678.

104. Dixit A., Sharma R. Visual-based swarm formation control using stereo vision and LiDAR // *Robotics and Autonomous Systems*. — 2023. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104443.

105. Tolstaya E., Paulos J., Kumar V., Ribeiro A. Multi-Robot Coverage and Exploration using Spatial Graph Neural Networks // *2021 IEEE/RSJ IROS*. — 2021. — P. 8944-8950. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636675.

106. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator // *IEEE Trans. Robot.* — 2017. — Vol. 34. — P. 1004-1020. DOI: 10.1109/TRO.2018.2853729.
107. Scaramuzza D., Achtelik M. C., Doitsidis L., et al. Vision-controlled micro flying robots: from system design to autonomous navigation and mapping in GPS-denied environments // *IEEE Robotics and Automation Magazine.* — 2014. — Vol. 21, No. 3. — P. 26-40. DOI: 10.1109/MRA.2014.2322295.
108. Lee J. Y., Kim H. S., Choi K. H., et al. Adaptive GPS/INS integration for relative navigation // *GPS Solutions.* — 2016. — Vol. 20, No. 1. — P. 63-75. DOI: 10.1007/s10291-015-0482-1.
109. Dehghani M. A., Menhaj M. B. Integral sliding mode formation control of fixed-wing unmanned aircraft using seeker as a relative measurement system // *Aerospace Science and Technology.* — 2016. — Vol. 58. — P. 318-327. DOI: 10.1016/j.ast.2016.08.026.
110. Wong X. I., Majji M. Relative positioning method for UAVs based on multi-source information fusion // *ResearchGate.* — 2022. DOI: 10.2514/6.2022-2435.
111. Dorsch M., Meehan B., Michalski W. P., et al. Dual-role FilmArray diagnostics for high-impact viral diseases // *Australian Veterinary Journal.* — 2016. — Vol. 94, No. 3. — P. 64-66. DOI: 10.1111/avj.12411.
112. Chmaj G., Selvaraj H. Distributed processing applications for UAV/drones: a survey // *Progress in Systems Engineering.* — 2015. — P. 449-454. DOI: 10.1007/978-3-319-08422-0_49.
113. Watson N., John N., Crowther W. Simulation of unmanned air vehicle flocking // *Proceedings of Theory and Practice of Computer Graphics.* — 2013. — P. 130. DOI: 10.2312/egp.20131016.
114. Saffre F., Hildmann H., Karvonen H., Lind T. Monitoring and Area-optimized UAV swarm network for search and rescue operations // *Proc. 10th Annu. Comput. Commun. Workshop Conf. (CCWC).* — 2020. — P. 613-618. DOI: 10.1109/CCWC47524.2020.9031201.

115. Sarras I., Marzat J., Bertrand S. Bearing-only visual SLAM for small unmanned aerial vehicles in GPS-denied environments // *Int. J. Autom. Comput.* — 2013. — Vol. 10, No. 5. — P. 387-396. DOI: 10.1007/s11633-013-0735-8.
116. Mayya S., Pierpaoli P., Egerstedt M. Voluntary Retreat for Decentralized Interference Reduction in Robot Swarms // *IEEE/RSJ IROS.* — 2018. DOI: 10.1109/IROS.2018.8594247.
117. Wilson S., Glotfelter P., Wang L., Mayya S., Notomista G., Mote M., Egerstedt M. The robotarium: Globally impactful opportunities, challenges, and lessons learned in remote-access, distributed control of multirobot systems // *IEEE Control Systems Magazine.* — 2020. — Vol. 40, No. 1. DOI: 10.1109/MCS.2019.2940063.
118. Ames A.D., Coogan S., Egerstedt M., Notomista G., Sreenath K., Tabuada P. Control barrier functions: Theory and applications // *European Control Conference.* — 2019. — P. 3420-3431. DOI: 10.23919/ECC.2019.8796030.
119. Mox D., Kumar V., Ribeiro A. Learning Connectivity-Maximizing Network Configurations // *IEEE Robotics and Automation Letters.* — 2022. — Vol. 7, No. 2. — P. 5552-5559. DOI: 10.1109/LRA.2022.3146524.
120. Zhang L., Wang Y. Mesh networking and ad-hoc communication in drone swarms // *Sensors.* — 2023. DOI: 10.3390/s23052683.
121. Saffre M. I. Human-Centered Interaction with UAV Swarms // *HCI 2021 submission.* — 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77599-5_22.
122. Huang S., Teo R.S.H., Kwan J.L.P., Liu W., Dymkou S.M. Distributed UAV Loss Detection and Auto-Replacement Protocol With Guaranteed Properties // *J Intell Robotic Syst.* — 2019. — Vol. 93. — P. 303-316. DOI: 10.1007/s10846-018-0818-4.
123. Xu B., Liu T., Bai G., Tao J., Zhang Y., Fang Y. A Multistate Network Approach for Reliability Evaluation of Unmanned Swarms by Considering Information Exchange Capacity // *Reliability Eng Syst Saf.* — 2022. — Vol. 219. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108221.
124. Zhong Q., Yu Y., Zhong L., Yan X. UAV (swarm) operations // *CHINESE J AERONAUT.* — 2025. DOI: 10.1016/j.cja.2024.08.015.

125. Kong L., Wang L., Cao Z., Wang X. Resilience evaluation of UAV swarm considering resource supplementation // *Reliability Engineering and System Safety*. — 2024. — Vol. 241. DOI: 10.1016/j.res.2023.109673.
126. Chen Y., Qin D., Yang X., et al. A deployment strategy for UAV-aided data collection in unknown environments // *IEEE Sens. J.* — 2024. — Vol. 24. — P. 27017-27028. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3415175.
127. Szklany M., Cohen A., Boubin J. Tsunami: Scalable, fault tolerant coverage path planning for UAV swarms // *Proc. of ICUAS*. — 2024. — P. 711-717. DOI: 10.1109/ICUAS60882.2024.10556811.
128. Gui J., Yu T., Deng B., Zhu X., Yao W. Decentralized multi-UAV cooperative exploration using dynamic centroid-based area partition // *Drones*. — 2023. — Vol. 7. — P. 337. DOI: 10.3390/drones7050337.
129. Paredes W.D., Vakilinia I. LoRa technology in flying ad hoc networks: a survey of challenges and open issues // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23. — P. 2403. DOI: 10.3390/s23052403.
130. Chaimowicz L., Michael N., Kumar V. Controlling Swarms of Robots Using Interpolated Implicit Functions // *Proc. of 2005 IEEE ICRA*. — 2005. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570776.
131. Sarras I., Marzat J., Bertrand S. Collaborative multiple micro air vehicles' localization and target tracking // *Int. J. Micro Air Vehicles*. — 2018. — Vol. 10. DOI: 10.1177/1756829318789886.
132. Tolstaya E., Butler L., Mox D., Paulos J., Kumar V., Ribeiro A. Learning Connectivity for Data Distribution in Robot Teams // *2021 IEEE/RSJ IROS*. — 2021. — P. 413-420. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636873.
133. Sun K., Schlotfeldt B., Pappas G. J., Kumar V. Stochastic Motion Planning Under Partial Observability for Mobile Robots With Continuous Range Measurements // *IEEE Transactions on Robotics*. — 2021. — Vol. 37, No. 3. — P. 979-995. DOI: 10.1109/TRO.2020.3042129.
134. Bajec I. L., Heppner F. H. Organized flight in birds // *Animal Behaviour*. — 2009. — Vol. 78. — P. 777-789. DOI: 10.1016/j.anbehav.2009.07.007.

135. Jia Y., Vicsek T. Flocking of autonomous flying robots // *New Journal of Physics*. — 2019. DOI: 10.1088/1367-2630/ab35db.
136. Zhao J., Chen S., Chi P., Wang Y. Dynamic merging and splitting for large-scale swarm navigation of UAVs and UGVs in unknown area // *Robot Auton Syst*. — 2026. DOI: 10.1016/j.robot.2025.104788.
137. Liu J., Xu Q. Y., Su M. Efficient Electromagnetic Scattering Signature Restoration for UAV Swarm Targets Based on Equivalent Principle Algorithm // *Preprint*. — 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3847583/v1.
138. Chen X., Zhang P., Li F., Du G. A cluster first strategy for distributed multi-robot task allocation problem with time constraints // *Proc. of 2018 WRC SARA*. — 2018. DOI: 10.1109/WRC SARA.2018.8475585.
139. Karaguzel T. A., Cambier N., Eiben A. E., Ferrante E. Collective Gradient Following with Sensory Heterogeneous UAV Swarm // *Distributed Autonomous Robotic Systems*. — 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-51497-5_14.
140. Shimizu M., Ishiguro A. An amoeboid modular robot that exhibits real-time adaptive reconfiguration // *Proc. of 2009 IEEE/RSJ IROS*. — 2009. — P. 1496-1501. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354508.
141. Godio S., Primatesta S., Guglieri G., DAVIS F. A Bioinspired Neural Network-Based Approach for Cooperative Coverage Planning of UAVs // *Information*. — 2021. — Vol. 12. — P. 51. DOI: 10.3390/info12020051.
142. Xie Y., Han L., Dong X., Li Q., Ren Z. Bio-Inspired Adaptive Formation Tracking Control for Swarm Systems With Application to UAV Swarm Systems // *Neurocomputing*. — 2021. — Vol. 453. — P. 272-285. DOI: 10.1016/j.neucom.2021.05.015.
143. Wang C., Wang D., Gu M., et al. Bioinspired Environment Exploration Algorithm in Swarm Based on Lévy Flight and Improved Artificial Potential Field // *Drones*. — 2022. — Vol. 6. — P. 122. DOI: 10.3390/drones6050122.
144. Wang K., Zhang X., Qiao X., et al. Adjustable Fully Adaptive Cross-Entropy Algorithms for Task Assignment of Multi-UAVs // *Drones*. — 2023. — Vol. 7. — P. 204. DOI: 10.3390/drones7030204.

145. Zeng Y., Ren K., Sun Q., Zhang Y. A Resilient Task Allocation Method for UAV Swarm Based on PSO-ILP Bilevel Nested Optimization // Preprint. — 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2765091/v1.
146. Bejiga M., Zeggada A., Nouffidj A., Melgani F. A Convolutional Neural Network Approach for Assisting Avalanche Search and Rescue Operations With UAV Imagery // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9. — P. 100. DOI: 10.3390/rs9020100.
147. Phadke A., Medrano A. Increasing Operational Resiliency of UAV Swarms: An Agent-Focused Search and Rescue Framework // Aerosp. Res. Commun. — 2024. DOI: 10.3389/arc.2023.12420.
148. Khan N.A., Jhanjhi N.Z., Brohi S.N., et al. A Secure Communication Protocol for Unmanned Aerial Vehicles // Cmc-computers Materials & Continua. — 2022. — Vol. 70. — P. 601-618. DOI: 10.32604/cmc.2022.019553.
149. Catuogno L., Galdi C. Secure Firmware Update: Challenges and Solutions // Cryptogr. — 2022. DOI: 10.3390/cryptography6030041.
150. Li L., Chen Y., Ma D. Anti-asynchrony output regulation for switched systems under switching-Q-learning event-triggering against DoS attacks // Sci China Inf Sci. — 2024. DOI: 10.1007/s11432-023-4028-5.
151. Rhudy M., Gu Y., Gross J., Chao H. Onboard Wind Velocity Estimation Comparison for Unmanned Aircraft Systems // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. — 2017. — Vol. 53, No. 1. DOI: 10.1109/TAES.2017.2651664.
152. Wang H., Chen M., Fu P. A distributed fault-tolerant mechanism for mission-oriented unmanned aerial vehicle swarms // Int. J. Commun. Syst. — 2022. DOI: 10.1002/dac.5100.
153. Yan Y., Sun Z., Hou Y., et al. UAV swarm mission planning and load sensitivity analysis based on clustering and optimization algorithms // Appl. Sci. — 2023. — Vol. 13. DOI: 10.3390/app132312438.
154. Wang X., Zhang X., Lu Y., et al. Target trajectory prediction-based UAV swarm cooperative for bird-driving strategy at airport // Electronics. — 2024. — Vol. 13. DOI: 10.3390/electronics13193868.

155. Yu Y., Lee S. Multi-UAV coverage path assignment algorithm considering flight time and energy consumption // *IEEE Access*. — 2024. — Vol. 12. — P. 26150-26162. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3366052.

156. Phadke A., Boyd J., Medrano F.A., Starek M. Navigating the skies: examining the FAA's remote identification rule for unmanned aircraft systems // *Drone Syst. Appl.* — 2023. — Vol. 11. — P. 1-4. DOI: 10.1139/dsa-2023-0012.

157. De Oliveira D.C., Wehrmeister M.A. Using deep learning and low-cost rgb and thermal cameras to detect pedestrians in aerial images // *Sensors*. — 2018. — Vol. 18. — P. 2244. DOI: 10.3390/s18072244.

158. Wu X., Li W., Hong D., Tao R., Du Q. Deep learning for unmanned aerial vehicle-based object detection and tracking: A survey // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. — 2021. — Vol. 10. — P. 91-124. DOI: 10.1109/MGRS.2021.3115137.

159. Cruz Ulloa C., Orbea D., del Cerro J., Barrientos A. Thermal, multispectral, and rgb vision systems analysis for victim detection in sar robotics // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14. — P. 766. DOI: 10.3390/app14020766.

160. Prata A. d. S. S., Almeida F.C., et al. Developing a uav platform for victim localization on search and rescue operations // *Proc. of 2022 IEEE 31st ISIE*. — 2022. — P. 721-726. DOI: 10.1109/ISIE50799.2022.9809462.

161. Denissova N., Nurakynov S., et al. Remote sensing techniques for assessing snow avalanche formation factors // *Atmosphere*. — 2024. — Vol. 15. — P. 1343. DOI: 10.3390/atmos15111343.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи

Додаток 12

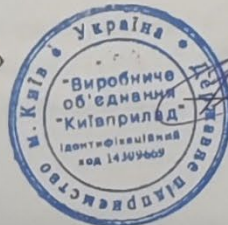
12.03.2026 № 231

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут» Таранова Дениса Володимировича на тему: «*Методи адаптивного керування реконфігурацією та структурним злиттям роїв БПЛА в умовах невизначеності*» на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» впроваджені в діяльності ДП «ВО «КИЇВПРИЛАД».

Зокрема, у процесі підготовки пропозицій щодо розробки та модернізації апаратного і програмного забезпечення бортових систем керування для перспективних безпілотних авіаційних комплексів використано аналітичні матеріали щодо застосування запропонованих у 3 та 4 розділах дисертації гібридних алгоритмів адаптивного керування реконфігурацією та методів інкрементального злиття топологій для їх подальшої інтеграції у мікропроцесорні модулі польотних контролерів і систем зв'язку БПЛА. Впровадження запропонованого підходу на етапі проектування логіки управління дозволило оптимізувати обчислювальне навантаження на бортове обладнання, підвищити структурну надійність комунікаційної мережі в умовах завад та покращити загальні показники енергоефективності й автономності групи БПЛА під час виконання спільних місій.

Керівник
ДП «ВО «КИЇВПРИЛАД»



(підпис)

Володимир Білий
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Додаток 2. Список публікацій здобувача за темою дисертації.

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Taranov D. V., Sineglazov V. M., Yudenko I. O. Algorithm for precise payload drop from FPV drone with account of wind strength and automatic position correction. *Electronics and Control Systems*. 2024. № 3 (81). P. 54–58. DOI: 10.18372/1990-5548.81.18993. 0,5 публікації
2. Taranov D. V. Hybrid methodology for rebuilding a swarm of drones based on local capabilities and global coordination. *Electronics and Control Systems*. 2025. № 1 (83). P. 35–41. DOI: 10.18372/1990-5548.83.19870.
3. Taranov D. V., Sineglazov V. M. Prediction of moving targets and adaptive avoidance in hybrid PSO-MPC for a swarm of UAVs. *Electronics and Control Systems*. 2025. № 2 (84). P. 76–83. DOI: 10.18372/1990-5548.84.20197.
4. Taranov D. V., Sineglazov V. M. Decentralized local-priority communication protocol for small unmanned aerial vehicle swarms. *Electronics and Control Systems*. 2025. № 3 (85). P. 40–47. DOI: 10.18372/1990-5548.85.20430.

Матеріали та тези наукових доповідей:

1. Таранов Д. В. Використання методу максимальної маржі для інтелектуальної класифікації даних. *ABIA-2023: матеріали XVI міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 18–20 квітня 2023 р.)*. С. 29 - 32
2. Таранов Д. В., Синеглазов В. М. Нейромережева система автозахоплення та трекінгу цілі FPV дроном з автономним зворотним зв'язком. «*Авіація в XXI столітті*» – «*Безпека в авіації та космічні технології*»: матеріали XI Всесвітнього конгресу (м. Київ, 26 вересня 2024 р.). С. 25 - 29.
3. Таранов Д. В., Синеглазов В. М. Гібридний підхід до динамічної перебудови формацій рою БПЛА на основі глобального планування та локального потенційного керування. *ABIA-2025: матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 23 квітня 2025 р.)*. Секція 10, С. 6–10.
4. Taranov D. V. Target interception using a multilayer UAV swarm formation. *2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (Kyiv, October 21–24, 2025)*. С. 316 - 320