



УДК 519.8

Л.Ф. ГУЛЯНИЦЬКИЙ

Інститут кібернетики ім.В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: leonhul.tcyb@gmail.com.

РОЇ БПЛА ТА ЇХНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Анотація. Розглянуто ключові проблеми планування та реалізації місій груп безпілотних літальних апаратів (БПЛА), насамперед їхніх роїв, та основні підходи до формулювання та розв'язування задач, що виникають, на основі аналізу наукових публікацій останніх років. Запропоновано означення низки термінів, що вживаються у цій сфері. Наведено аспекти планування місій дронів з використанням запропонованої системи характеристик роїв.

Ключові слова: БПЛА, група дронів, команда дронів, рій БПЛА, планування місій рою, спеціалізація місій.

ВСТУП

Концепція рою дронів, перед усім безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що передбачає скоординовану роботу групи БПЛА для досягнення спільної мети, набуває все більшого значення в сучасних технологічних розробках. Рої БПЛА надають значні переваги порівняно з поодинокими апаратами, зокрема підвищену відмовостійкість, розширені можливості збору даних, здатність виконувати складні завдання та охоплювати великі території. Їх застосовують у таких сферах, як аеророзвідка, логістика, сільське господарство, пошуково-рятувальні операції, ліквідація наслідків катастроф, мобільні безпроводні мережі, геодезична зйомка та картографування, прикордонне патрулювання, воєнні застосування та ін. (див., наприклад, [1–7]). Проте їхнє функціонування пов'язане з низкою труднощів, а саме обмеження польотних ресурсів, вплив завад різного характеру, складність координації дронів (агентів) рою та вирішення проблем, які виникають за потреби масштабування рою.

Однак реалізація потенціалу роїв БПЛА неможлива без ефективного планування місій. Останнє являє собою складний багатоаспектний процес, що включає планування індивідуальних та групових траєкторій, формування конфігурацій рою, позиціонування, керування рухом, комунікації, визначення та розподіл цілей / об'єктів, а також вироблення стратегій обслуговування, вибору лідера та адаптацію до непередбачуваних обставин у реальному часі.

На відміну від планування місій для одного БПЛА, планування для рою стикається з експоненційним зростанням складності задач, пов'язаних з необхідністю врахування взаємодій між агентами, їхніх обмежень та динаміки середовища.

Потенціал застосування команд і роїв БПЛА безпосередньо залежить від здатності спеціалізованих програмно-алгоритмічних засобів враховувати динамічність і невизначеність середовища та оптимізувати керування групами БПЛА. Дослідження останніх років демонструють значний прогрес у розробленні алгоритмів, що підвищують автономність, стійкість та адаптивність роїв.

© Л.Ф. Гуляницький, 2026

З розвитком технологій штучного інтелекту, зокрема машинного навчання, а також із вдосконаленням сенсорів та комунікаційних систем з'явилися нові підходи до розв'язування ключових задач використання роїв БПЛА, серед яких багатоагентне навчання з підкріпленням (MARL) [8], глибоке навчання з підкріпленням (DRL) [9], Q-навчання / глибока Q-мережа [10] та графові нейронні мережі.

Керування роями БПЛА залишається актуальною та складною науково-технічною проблемою. Це зумовлює збільшення кількості науково-технічних конференцій та семінарів і відповідних публікацій. Так, лише за шість місяців 2025 р. згідно з даними Google-Scholar за тематикою «Планування місій роїв БПЛА» було опубліковано майже три тисячі робіт.

Ця стаття має на меті проаналізувати основні проблеми, що виникають під час планування місій та експлуатації роїв БПЛА, базуючись на найновіших дослідженнях у цій галузі. Наведено приклади відповідних публікацій (в основному за останні півтора року).

ГРУПИ, РОЇ ТА ЗГРАЇ ДРОНІВ І ЇХНІ МІСІЇ

Визначимо низку понять, які будуть використовуватися далі і тлумачення яких у відомих публікаціях неоднозначні.

Агент — сутність, що може взаємодіяти з іншими агентами та середовищем, має тип, який задається множиною атрибутів, та поведінку, яка визначається множиною його дій і станом середовища. Одне із перших формальних означень агента у теорії програмування було запропоновано в [11].

Середовище — сутність, у якій функціонують та взаємодіють агенти.

Ройовий інтелект — розділ штучного інтелекту, у якому досліджують та застосовують принципи організації систем, що складаються з декількох відносно простих агентів, які виконують спільну місію у заданому середовищі. Базова концепція — моделювання колективної поведінки децентралізованих, самоорганізованих систем, як-от колонії мурах, рої бджіл, косяки риб або зграї птахів, для вирішення складних проблем підтримки прийняття та оптимізації рішень.

Ціль — об'єкт середовища, який потрібно відвідати чи обслужити.

Дрон — безпілотний рухомий апарат, пристрій (БПЛА, рухома роботизована система (наземний, надводний або підводний безпілотний апарат) тощо).

Група дронів — два або більше дронів (агентів), об'єднаних для виконання спільної місії чи завдання.

Команда — група дронів, учасники якої виконують спільну місію без взаємодії між собою на етапі безпосереднього виконання.

Зграя дронів (drone flocks) — група дронів, які діють автономно, координуючи свої рухи через локальні взаємодії та аналіз середовища без керування з наземного центру.

Рій дронів (drone swarms) — група дронів, яка оснащена засобами ройового інтелекту, що здатна автономно взаємодіяти, адаптуватися до змінних умов та приймати колективні рішення в процесі спільного виконання завдання (місії) в автономному режимі чи з мінімальним втручанням оператора.

Отже, група дронів, на відміну від простої їхньої сукупності, може бути командою, зграєю або роєм. До важливих характеристик, які виокремлюють різні види груп БПЛА, варто віднести рівень їхньої координації та кооперування в процесі планування місій, розроблення траєкторій руху, способів мережевих комунікацій і керування.

Як впливає із наведених означень, зграя є окремим випадком рою дронів. Поведінка зграї дронів схожа на поведінку птахів у зграї чи риб у косяку, де кожен дрон має виконувати прості правила, наприклад, утримувати мінімальну відстань, узгоджувати напрямок руху і ступінь зближення.

Рої дронів відрізняються від зграї дронів рівнем автономності та координації.

Рої дронів зазвичай демонструють нижчу індивідуальну автономність, їхні рухи (періодично) координуються через централізоване керування або попередньо визначені маршрути. Зграї дронів зазвичай характеризуються вищим рівнем індивідуальної автономності, коли дрони приймають рішення на основі локальної інформації та координуються через зв'язок між собою для досягнення спільних цілей.

Рої дронів часто використовують спеціальні механізми керування, такі як підходи «лідер–послідовник», «віртуальна структура» або алгоритми, попередньо запрограмовані на етапі планування маршруту польоту для забезпечення синхронізації руху та за потреби підтримки конфігурації рою.

Попри зазначені відмінності терміни «рій дронів» та «зграя дронів» іноді використовують як взаємозамінні, і межа між їхнім розумінням може бути розмитою. Це частково пов'язано з тим, що поведінка зграї (згуртованість, вирівнювання, розділення) часто інтегрується в стратегії керування роями дронів. Крім того, відсутність загальноприйнятого визначення «рою БПЛА» навіть серед експертних спільнот сприяє цій неоднозначності. Відмінність часто залежить від акцентування на ступені автономності та характері координації. Зграю можна розглядати як специфічний тип скоординованої поведінки, що характеризується щільним строєм та подібним напрямком, тоді як рій може охоплювати ширший спектр скоординованих поведінок, включаючи (але не обмежуючись) принципи зграї, і часто передбачає вищий ступінь розподіленого виконання завдань. Тому контекст, в якому використовують ці терміни, є вирішальним для інтерпретації. У воєнному контексті термін «рій» може бути кращим, коли йдеться про масштаб та потенційну автономність складних операцій, тоді як у розважальній чи побутовій сфері термін «зграя» може використовуватися більш вільно для будь-якої візуально скоординованої групи дронів.

За середовищем, у якому відбувається місія, розрізнятимемо такі види дронів: БПЛА, наземні рухомі роботизовані системи, надводні і підводні дрони. Зазначимо, що основна увага далі приділена роям, у яких агентами є БПЛА.

Типові завдання, що виникають у різних сферах застосування БПЛА, наведено у табл. 1. (Більш детально вони будуть розглянуті далі.)

Групи БПЛА у «чистому вигляді» застосовують у воєнній сфері під час виконання військових операцій, насамперед ударах по цілях, які розосереджені на певній території [12–14]. Також завданням місії групи може бути доставка товарів чи інших сутностей, медпрепаратів, результатів аналізів чи зразків забірного матеріалу для аналізів тощо [15].

Таблиця 1. Основні види місій БПЛА

Завдання, склад місії	Сфери застосування
Обслуговування заданої множини як фіксованих, так і рухомих об'єктів окремими БПЛА	Логістика, ударні операції, медична сфера
Обстеження заданої множини об'єктів / цілей на місцевості групою БПЛА	Моніторинг об'єктів та систем, розвідувальні операції, сільське господарство
Пошук / виявлення заданих типів об'єктів, розташованих у виокремленій зоні, групою чи роєм БПЛА	Розвідувально-рятувальні операції
Виявлення, ідентифікація і ліквідація статичних чи динамічних цілей роєм або зграєю БПЛА	Оборона
Встановлення чи відновлення зв'язку в рої чи в зграї БПЛА у складних умовах	Функціонування рою у важкодоступних районах, ретрансляція сигналів, створення спецмереж

Команди БпЛА використовують під час виконання багатьох видів моніторингових або розвідувальних місій, де головними критеріями оптимальності є мінімізація часу виконання місії чи корельована з цим сумарна довжина маршрутів агентів рою, а кожна ціль (об'єкт) має бути відвідана лише один раз. Як для цих задач, так і для логістичних місій часто виокремлюють два типи умов: для кожного БпЛА зафіксовано одне місце старту і приземлення — база; всі чи деякі БпЛА можуть злітати з однієї бази, а приземлятися на іншій [16].

У логістиці та деяких інших застосуваннях БпЛА ефективно використовують разом із транспортним засобом, який може здійснювати їхнє переміщення, з оптимізацією розташування місць старту і повернення, тобто динамічних баз. При цьому виникають, наприклад, такі задачі: є транспортний засіб, що може переміщуватися від початкового місця базування (бази) до інших, маючи на борту один БпЛА з обмеженим польотним ресурсом. Поповнення польотного ресурсу в процесі виконання обстеження (заміна акумулятора чи заправлення паливом) відбувається тільки у місцях базування транспортного засобу (базах) на його маршруті, які вважаються заданими. Процес задання маршруту полягає у такому визначенні фрагментів маршруту БпЛА з окремих баз та часових інтервалів його обслуговування на цих базах, щоб була змога провести обстеження цілей чи обслуговування клієнтів за мінімальний час. Останнім часом розглядають задачі, в яких використовуються не тільки декілька БпЛА, а і більше одного транспортного засобу [17].

Так, у воєнних застосуваннях [5, 13] таким засобом може бути спеціальний транспортний літак, як, наприклад, у проєкті Gremlins [18], дрономатка або вантажівка, як у логістиці [19–21]. (Термін дрономатка (mothership) часто використовують для опису БпЛА-носія або великого безпілотної літака / гелікоптера / корабля, який може переносити, випускати та, можливо, навіть приймати назад дрони, продукуючи рішення про використання або розгортання менших дронів, які працюють як рій.) У подібних випадках виникають проблеми синхронізації руху транспорту і БпЛА з урахуванням як польотного ресурсу БпЛА, так і маршруту руху транспортного засобу [22, 23].

Планування місій БпЛА може включати проблеми формування і оптимізації маршрутів, позиціонування, керування рухом, призначення цілей, вироблення стратегій обслуговування цілей, вибору лідера, підтримання зв'язку, формування початкової конфігурації рою, створення ієрархій та кластерів для керування великими роями, а також проблеми масштабування.

Загальну схему функціонування роїв БпЛА під час виконання типових завдань зображено на рис. 1.

Розроблення математичних моделей і методів оптимізації, призначених для вирішення проблем планування місій команд БпЛА, може включати такі задачі:

- визначення кількості БпЛА, необхідних для виконання завдання (формування команди / рою БпЛА);
- розподіл групи БпЛА по можливим місцям базування;
- розподіл цілей між БпЛА із групи та базами, якщо їх декілька;
- оптимізація маршрутів групи БпЛА як команди, що виконує поставлене завдання, чи гібридних транспортних засобів разом з БпЛА;
- підтримка функціонування мобільних спецмереж, що зв'язують БпЛА та наземні пункти керування (НПК), захист таких мереж і оптимізація передавання інформації в них;
- пошук, обстеження, супроводження рухомих цілей (трекінг) і / чи їхнє обслуговування.

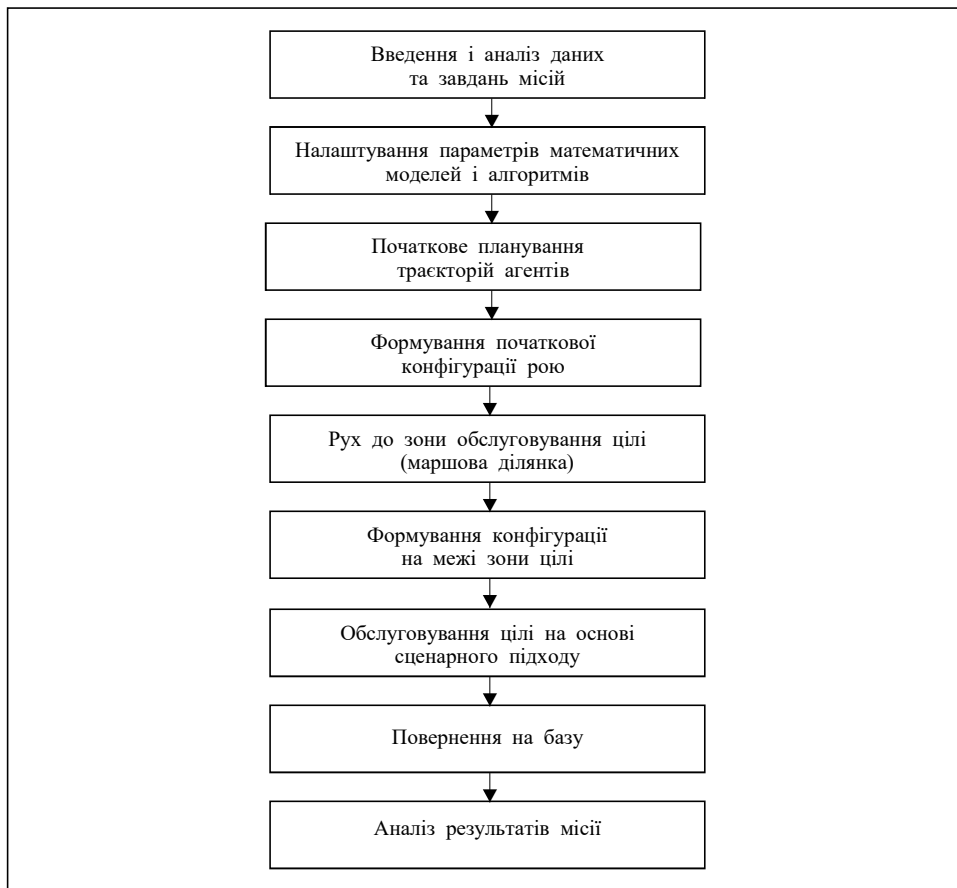


Рис.1. Загальна схема функціонування роїв БПЛА

Варто зазначити, що у разі застосування роїв БПЛА, попри невпинний розвиток технологій виготовлення і використання датчиків, процесорів, комунікаційного обладнання, часто важко (а інколи і неможливо) отримати потрібні для математичних моделей і алгоритмів дані з необхідною точністю і оперативністю.

Основними завданнями планування і керування роєм БПЛА у процесі виконання місії є такі:

- формування початкової конфігурації рою БПЛА;
- узгодження маршрутів БПЛА у рої під час польоту до зони обслуговування цілей (уникнення зіткнень і утримання конфігурації рою, позиціонування БПЛА);
- підтримання зв'язку БПЛА в різних умовах;
- пошук, обстеження, супроводження (трекінг) статичних або рухомих цілей;
- вироблення стратегії обслуговування цілей / об'єктів.

Ці завдання формують з урахуванням класифікації, кількості та важливості цілей, оцінювання технічних та функціональних характеристик задіяних БПЛА, наявності чи відсутності сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), завад на місцевості, дії засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Далі акцент буде зроблено на роях БПЛА, хоча це здебільшого буде стосуватися зграй та команд БПЛА чи інших дронів.

Основні компоненти структури рою БПЛА наведено у табл. 2 [6].

Далі розглянемо деякі аспекти планування місії з посиланнями на новітні наукові публікації.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МІСІЇ РОЇВ ДРОНІВ

За метою місії можна виокремити одноцільові (спрямовані на одну ціль чи об'єкт) та багатоцільові рої дронів. Своєю чергою, цілі можуть бути визначеними апрорі чи їх необхідно виявити і обслужити в заданій зоні пошуку або лише обстежити таку зону.

Залежно від цілей застосувань груп БпЛА, вибору їхніх ключових характеристик існують різні підходи до класифікації таких груп (команд, роїв) [1–7, 24].

Місії роїв дронів характеризуються низкою ключових параметрів, що визначають їхню структуру, склад, завдання та функціональні можливості (спроможності), а також інформаційні процеси, що забезпечують виконання місії.

Перш ніж навести перелік і стислий опис таких характеристик зауважимо, що основну увагу приділено роєм, у яких агентами є БпЛА.

Структури рою:

- **гомогенний рій.** Його утворюють однотипні за технічними характеристиками агенти. Основними техніко-конструктивними характеристиками є тип БпЛА (коптери / багатороторні чи літакові), ємність акумулятора чи обсяг польотного ресурсу двигуна;

- **гетерогенний рій.** Можливі два напрями класифікації: за технічними або функціональними характеристиками агентів. Функціонально однотипні агенти — такі, що відіграють у рої однакові ролі (функції), хоча і можуть суттєво відрізнятися кількісними значеннями параметрів агентів. У функціонально різнотипних роях агенти при цьому ще й відіграють різні ролі під час виконання місії, наприклад, лідера, дрономатки чи послідовників. Лідером (апріорі чи в ході місії) визначається той агент, який у поточний момент виконує керівну та інформативну функцію для решти агентів. З ним взаємодіє оператор, що керує всім роєм, а решта агентів отримують через нього потрібну для виконання місії інформацію [25]. Все більше застосовують рої, що об'єднують як традиційні БпЛА, так і мікролітальні апарати [26];

Таблиця 2. Компоненти інфраструктури роїв БпЛА

Компонент	Опис
БпЛА літакового типу чи багатороторні БпЛА (коптери)	Окремі агенти, оснащені датчиками, процесорами та обладнанням для зв'язку та координації
Блок керування	Керує роєм, забезпечує роботу в межах бажаних параметрів, може включати наземну станцію, виокремленого агента або хмарну систему
Система зв'язку	Безпроводна мережа для обміну інформацією в реальному часі з використанням протоколів Wi-Fi, Bluetooth або Zigbee
Датчики	Інтегровані датчики (наприклад, камери, LiDAR, GPS) для збору та оброблення даних про навколишнє середовище
Алгоритми	Алгоритми планування маршруту, уникнення зіткнень, керування формуванням та прийняття рішень
Джерело живлення	Акумулятори або інші пристрої, критичні для часу польоту та продуктивності
Система навігації	GPS, інерційна навігація та візуальна одометрія для автономної навігації та уникнення зіткнень

- **гібридний рій.** Він об'єднує суттєво різнотипних агентів — БпЛА, авто, літаки, кораблі та інші засоби [19, 22]. Наприклад, його застосовують для енергетичного забезпечення рою, коли є наземна станція як мобільна зарядна станція (mobile charging / refueling station) для рою. Так, БпЛА виконують завдання у зоні місії, а коли рівень заряду низький, повертаються до станції для асинхронної підзарядки, після чого повертаються до місії. Важливим застосуванням є прорив крізь зону дії РЕБ, ППО. БпЛА-носій (наземна роботизована платформа, безпілотний повітряний чи водний апарат) доставляє рій малих дронів (наприклад, камікадзе) на велику відстань, випускає їх для атаки. Малі БпЛА можуть діяти як ударний рій (strike swarm) [27] або як приманки, переважуючи (overwhelming) ППО ворога. До цього набору на безпечній відстані може долучатися пілотований літак, використовуючи рій як досконалий сенсор та обманку (фіктивну ціль, decoy);

- **однорангова чи ієрархічна структура.** Об'єднання однотипних за функціональними характеристиками агентів утворюють однорангову архітектуру, яка може структуруватися в мережеві кластери під час керування великими роями. Ієрархічну структуру мають (гетерогенні) рої, агенти яких у процесі виконання завдань виконують суттєво різні функції [27]. Окрім зазначених функцій лідера та послідовників, у рій можуть включатися ще й такі агенти, які, наприклад, виконують функції ретрансляторів, аеророзвідників, обманок чи постановників радіоперешкод;

- **мультикластерний рій.** Кожен кластер у такому рої може мати власні завдання та цілі, що входять у загальний перелік задач місії. До прикладу, один кластер може виконувати розвідку, інший — створювати радіоелектронні перешкоди, третій — бути ретранслятором, а четвертий — завдавати удару. Це підвищує стійкість; якщо один кластер виходить з ладу, інші продовжують виконувати свої завдання, а система керування автоматично перерозподіляє функції або ініціює перегрупування. Використання мультикластерного рою дає змогу керувати великою кількістю агентів, оскільки замість керування кожним БпЛА окремо, оператор керує лише кластерами.

Технології керування:

- **централізоване / децентралізоване.** Ці способи керування визначають, хто приймає рішення у разі наявності або відсутності єдиного центру керування. У централізованій системі один оператор або головний БпЛА керує всім роєм. Деякі моделі керування цієї архітектури включають наземну станцію керування (БпЛА отримують команди безпосередньо від станції чи сервера), моделі «лідер–послідовники» чи «дронматка–підлеглі», хмарні обчислення. Централізований тип керування збільшує швидкість реакції рою на перепони у русі до цілі або загрози. Його перевагою є підвищена точність керування роєм та траєкторіями агентів, але проблемою є чутливість до втрати каналу зв'язку. У децентралізованій системі кожен агент приймає рішення автономно на основі даних про навколишнє середовище та за результатами взаємодії з іншими агентами на основі інформації від датчиків, зв'язку між БпЛА або за результатами роботи програмно-алгоритмічних засобів. Кожен БпЛА може приймати рішення самостійно — без керівництва оператора, центрального сервера або лідера [28]. При цьому підвищується стійкість до втрати зв'язку, масштабованість та гнучкість, хоча зростає складність досягнення узгодженості дій рою і відповідно сповільнюється час реакції на різкі зміни ситуації;

- **синхронне / асинхронне.** Ці способи керування описують, як часто і коли агенти обмінюються інформацією, ухвалюють рішення та виконують належні

дії. Згідно з принципом планування у роях із синхронною технологією керування період планування дискретизується з певним часовим інтервалом (часові мітки, фази), і рух агентів планується чи корегується у ці виокремлені моменти часу, чим зумовлена їхня здатність виконувати потрібні дії одночасно. При цьому важливим є досягнення стійкої синхронізації годинників серед БпЛА [29]. Підґрунтям для реалізації такого способу планування є наявність центрального блока керування (НПК, оператор, лідер), який у реальному часі відстежує та координує дії агентів рою. Натомість з асинхронною технологією керування основний принцип планування (наприклад, траєкторій, завдань) полягає в тому, що кожен БпЛА автономно або кооперативно, приміром, на основі консенсусу або більшості голосів приймає рішення щодо своїх дій, не чекаючи централізованого сигналу для синхронізованого обміну даними з іншими агентами. Тобто кожен БпЛА діє як напівавтонмний агент, який приймає своє рішення швидко і на основі обмежених локальних даних, що забезпечує високу стійкість, масштабованість та швидкість реакції рою на зміни в динамічному середовищі. Отже, БпЛА обмінюються інформацією (про стан, виконання частини завдання, виявлені об'єкти, конфлікти) не за чітким, синхронним графіком, а тоді, коли це можливо і необхідно (наприклад, у разі критичного зближення, зміни статусу завдання). Зв'язок часто є нестабільним та із затримками, але рій залишається працездатним. Іншим підходом є максимальне використання ресурсів НПК або дронамки для опрацювання інформації, яка надходить від агентів рою, для моделювання поточної ситуації, прогнозування та за потреби корегування траєкторії рою чи окремих агентів. За цією схемою можливо використання цифрових двійників [30, 31].

Спеціалізація місій:

- **розвідка та спостереження.** Місії з розвідки та спостереження можна розділити на кілька основних типів. Можна виокремити колективний моніторинг великих територій, розвідку, дорозвідку, розвідку з використанням спеціальних засобів та виявлення ворожих об'єктів для вказання цілей. Колективний моніторинг великих територій передбачає або використання великих роїв, або послідовне виконання декількох місій, оскільки впродовж однієї місії запасу руху усіх БпЛА буває недостатньо для моніторингу всієї території. За необхідності забезпечення регулярного моніторингу це породжує клас задач маршрутизації. Умови проведення розвідки визначаються, зокрема, залежно від пори дня, складності погодних умов (дощ, гроза, тощо) чи пори року. Окремо також виокремлюють розвідку з використанням спеціальних засобів (тепловізори, камери нічного бачення тощо). Дорозвідка передбачає додатковий збір інформації, часто для уточнення даних, отриманих раніше, характеризується необхідністю швидкого виконання, оскільки об'єкти, виявлені під час розвідки, можуть змінити локацію. Додатково варто виокремити виявлення ворожих об'єктів і надання даних для їхнього ураження, оцінку завданої шкоди, визначення динаміки відновлення ураженого об'єкта супротивником [32, 33];

- **сервісні та інформаційні.** Виконуються задачі збору, оброблення та передавання даних для забезпечення повнішої ситуаційної обізнаності про об'єкти, які не є ворожими, та про навколишнє середовище [34]. Рій може забезпечувати швидкий пошук об'єкта на території або моніторинг протяжного маршруту, наприклад, супровід конвою, контроль виконання наказів і завдань. Різні БпЛА в рої можуть працювати на різних висотах або з різними сенсорами (оптика, тепловізор, радар) для збору комплексних даних про об'єкт, підтримувати постійну конфігурацію навколо нього, наприклад, судна чи транспортного засобу для візу-

ального контролю та раннього виявлення потенційних загроз або непередбачуваних ситуацій. Також можливим використанням рою є створення 3D-моделей або детальних мап місцевості навколо заданого об'єкта в реальному часі (наприклад, у разі пошуково-рятувальних операцій або інспекції критичної інфраструктури [6]) чи навігаційний супровід об'єкта, коли БпЛА рою відіграють роль динамічних маяків, які допомагають об'єкту орієнтуватися у складних умовах (туман, відсутність GNSS). Якщо об'єкт рухається в зоні з обмеженим зв'язком, частина рою може зайняти позиції для формування стійкої спецмережі (mesh-мережі), забезпечуючи безперебійний зв'язок між об'єктом та центром керування [35];

- **логістика та забезпечення.** Доставка вантажів у складнодоступні (недоступні для наземного транспорту) райони / регіони [36]. Наприклад, доставка в умовах катастрофічних подій, коли вантажівка здійснює транспортування великих обсягів гуманітарної допомоги до безпечної точки висадки, а БпЛА забезпечують доставку «останньої милі» (last-mile delivery) невеликих, критично важливих вантажів (медикаменти) безпосередньо постраждалим, оминаючи зруйновані дороги [37];

- **пошуково-рятувальні операції.** Вони полягають у оперативному огляді зони лиха, виявленні пошкоджених об'єктів чи людей, які потребують допомоги, а також гасінні лісових пожеж. Рої БпЛА можуть швидко оцінити масштаби руйнувань унаслідок стихійного лиха (землетруси, повені) та виявити людей, які потребують допомоги [38–40];

- **моніторинг заданого регіону.** Проводяться інспекції мостів, трубопроводів, ліній електропередач та інших великих і протяжних об'єктів. Рої можуть швидко сканувати великі поля і плантації, що надає змогу оцінювати стан посівів та потреби у зрошенні, виявляти шкідників і хвороби для вироблення рішення щодо необхідності внесення добрив або пестицидів [41]. Важливим завданням є пошук мін і розмінування територій. Також БпЛА залучають до моніторингу транспортних потоків, вантажних перевезень та інвентаризації на великих складах [42, 43];

- **ударні операції.** Відбуваються скоординовані послідовні атаки дронів на одну або декілька цілей у режимі «камікадзе» (самі дрони є засобом ураження) [44] чи в режимі «бомберів» (БпЛА скидають підвішені боєприпаси, а самі скеровуються на базу). Цілі можуть бути статичні чи динамічні, зокрема, це можуть бути небажані БпЛА чи їхні рої і тоді мова може йти про антидронові місії [45];

- **картографування.** Створюються актуальні і оперативні моделі місцевості. У цьому контексті БпЛА можуть використовуватися як у воєнних цілях, так і в комерційних, таких як геодезична зйомка та виготовлення мап з високою роздільністю [46];

- **радіоелектронна боротьба.** Основні завдання — створення перешкод для БпЛА і підміна координат (coordinate spoofing), «зашумлення» робочих частот, передавання випадкових команд у радіоканал для виведення з ладу, придушення ворожих БпЛА (GNSS jamming), систем ППО та зв'язку [47].

Типи спеціальних місій:

- **виконання завдань на полі бою** (радіус дії до 15 км). Цю місію застосовують для ближньої розвідки, безпосередньої підтримки підрозділів на полі бою, для FPV-атак. Часто її виконують мікро- та міні-БпЛА, які запускають «з руки» або з простих пускових установок;

- **тактичні** (радіус дії від 15 до 50-80 км). Ці місії використовують для тактичної розвідки та спостереження, а також для виконання ударних місій. БпЛА можуть запускатися з катапульт або з мобільних пускових установок;

- **оперативно-тактичні** (радіус дії від 80 до 300 км). Ці місії призначені для оперативної розвідки та нанесення ударів по тактичній та найближчій оперативній глибині місць розташування противника. Зазвичай для виконання цих завдань виникає потреба в злітно-посадкових смугах або складних пускових пристроях;

- **оперативні** (радіус дії від 300 до 800 км) **та стратегічні** (радіус дії понад 800 км). Ці місії використовують для стратегічної розвідки, патрулювання та нанесення ударів на велику відстань. Рої для таких місій створюються з великих БпЛА, які здатні виконувати тривалий політ (long endurance) часто на великій висоті або ж виступати у ролі дрономатки.

Просторові організації рою:

- **жорстка конфігурація.** У ході виконання місії підтримується задана структура (формація) — клин, уступ (асиметричний клин), лінія чи інша геометрична фігура. Це є важливим у низці застосувань, особливо, коли на завершальному етапі місії потрібно знати місцезонаження кожного агента. Останнє може бути складною проблемою за наявності різного характеру перешкод та способів комунікації між агентами;

- **гнучка конфігурація.** Залежно від можливих змін умов та завдань може відбуватися адаптивне змінювання конфігурації рою та тактики відповідно до зміни обставин, втрати окремих апаратів або появи нових загроз. Така необхідність може виникати під час виконання місії у складних місцевих зонах чи за потреби уникнення дії РЕБ або інших антидронових засобів.

Ситуаційна обізнаність:

- **цілі відомі.** Особа, що приймає рішення, чи оператор має апріорну інформацію про кількість і розташування цілей, які потрібно відвідати. Завданням є обстеження чи обслуговування всіх заданих цілей або їхньої максимально можливої кількості з врахуванням наявних дронів та їхніх технічних можливостей;

- **пошук цілей.** Можуть бути задані цілі конкретного типу, які потрібно знайти у заданій області. Також можливе розвідування цілей у заданій області для визначення їхніх типів з перспективою подальшого відвідування (armed recurrences). Інша задача — пошук у достатньо великій області з розбиттям її на зони і оцінюванням ймовірностей знаходження цілі в кожній зоні [48];

- **сприйняття середовища, у якому виконується місія.** Вибір способу виконання місії залежать від того, чи є апріорною або такою, що визначається в ході місії, інформація про перешкоди, рельєф, погодні умови, насиченість завад у зоні пошуку, а також розташування засобів РЕБ. Ці дані використовуються для отримання оперативної геодезичної інформації та формування мап місцевості.

Сценарії обслуговування об'єктів (цілей):

- **фаза польоту рою.** Цей етап місії інколи називають маршовою ділянкою траєкторії рою. Він включає особливості переміщення рою до цілі, наприклад, на автопілоті в режимі cruise control;

- **розподілене сканування території.** Завдання рою полягає у тому, щоб поділити зону пошуку між кластерами або окремими дронами, мінімізуючи перекриття та максимізуючи ефективність покриття;

- **виявлення об'єктів.** За допомогою оператора чи бортового програмного забезпечення та систем штучного інтелекту / комп'ютерного зору рої можуть обробляти відеопотік у реальному часі для автоматичного виявлення та первин-

ної класифікації цілей. Для точної класифікації виявлених об'єктів (наприклад, будівлі, військові цілі, об'єкти критичної інфраструктури) агенти використовують навчені моделі нейромереж (наприклад, архітектуру YOLO та бібліотеки OpenCV). Окремим напрямом є виявлення летючих цілей, зокрема, розроблення антидронових заходів (counter-drone measures) [49–51];

- **супроводження та виявлення.** Основне завдання ударних БПЛА — фіксація ціленаведення на заключному етапі польоту. Цей етап місії включає високоточне наведення на конкретний візуальний орієнтир або сегмент цілі. Бортове програмне забезпечення БПЛА формує команди корегування польотом на основі відеопотоку та передає їх блоку керування польотом. Це дає змогу корегувати курс без втручання оператора до самого моменту ураження;

- **безпосередній вплив на об'єкт (кінетичне ураження).** На основі визначеної класифікації, а також критеріїв важливості цілей рої автономно або під керівництвом оператора мають визначати оптимальну ціль для атаки. Для формування оптимальної траєкторії атаки доцільно використовувати сценарні підходи. Після ураження ворожих позицій, техніки або інфраструктури БПЛА (або інші дрони рою) можуть фіксувати результат для подальшого оцінювання ефективності місії.

Способи розподілу цілей:

- **розподіл оператором.** Виконується під час планування місії чи оперативно в ході її виконання. Використовуються переваги групового обслуговування чи атакувальних дій, які можуть здійснювати всі агенти одночасно або по чергово;

- **використання математичних методів.** Засосовується на етапі планування місії на основі розвинених математичних методів оптимізації. При цьому можливе використання високопродуктивної обчислювальної техніки;

- **оперативний розподіл.** Вироблення рішення щодо розподілу чи уточнення поточного плану розподілу цілей в процесі виконання місії з використанням поточної інформації оператором чи програмно-алгоритмічними засобами в центрі керування;

- **сегментація образу цілі.** Цей спосіб полягає у розчленуванні цілі на її складові. Виконується алгоритмами ШП для ураження захищеної складної цілі в її слабкі місця або проведення комплексної атаки великого об'єкта для підвищення ефекту руйнування, зниження ціни вогневого впливу та унеможливлення відновлення цього об'єкта.

Використання геоінформації агентами:

- **мінімальний рівень.** Оператор під час керування роєм на основі свого досвіду та наявної інформації враховує усі чи більшість необхідних даних про загальну ситуацію, в якій виконується місія;

- **подання місцевості.** Використання за наявності актуальних е-мап місцевості (зокрема, супутникових зображень) може бути обмеженим у зоні зміни ландшафту, наприклад, після сильного землетрусу або внаслідок бойових дій. Тоді завданням стає формування поточного математичного відображення місцевості, зокрема, актуалізація наявних моделей в ході виконання завдань місії. Практикується використання спеціальних БПЛА, які запускаються попереду основного рою і збирають потрібну для отримання комплексної мапи геоінформацію за допомогою наявних технічних засобів [52].

Організація мережі:

- **типи зв'язку.** Використовують прямий зв'язок (peer-to-peer, mesh-мережа, ad-hoc мережа) між агентами або зв'язок через центральний вузол (НПК, лідер рою чи дрономатка). Рої БПЛА можуть створювати тимчасові мережі

зв'язку в районах, де наземна інфраструктура пошкоджена або відсутня, що є критично важливим для рятувальних та військових операцій. Зокрема, БпЛА можуть слугувати як рухомі ретранслятори зв'язку (communication relays) [53] і створювати повітряну ієрархічну спецмережу для підтримки зв'язку між наземними або морськими користувачами в умовах міста, гірської місцевості або дії засобів РЕБ [54];

- **стійкість до впливу дії засобів РЕБ.** Визначає здатність рою підтримувати зв'язок та функціонувати в умовах дії засобів РЕБ противника за відсутності стандартних каналів зв'язку, таких як GPS, ELRS, WiFi, Bluetooth;

- **надійність та безпеність.** Вони характеризують здатність функціонування мережі під час виконання місії в складних умовах (наявність завод і збурень, висота, на якій рухається рій, атмосферні умови), а також обсяг та швидкість передачі даних між агентами рою, що є критичним для координації дій у реальному часі [55]. У цивільних застосуваннях, таких як «інтернет розумних речей», безпечна інтеграція в наявні правила використання повітряного простору є важливою та тісно пов'язана зі стандартами шостого покоління (6G), стандартом IMT-2030 [56, 57]. Для вирішення таких проблем останніми роками застосовують методи штучного інтелекту [58] та алгоритми, які використовують блокчейн і смартконтакти [59, 60];

- **масштабованість.** Мова йде про здатність комунікаційних та обчислювальних засобів рою мінімально знижувати його ефективність у разі збільшення кількості агентів. Вона визначається технологічними обмеженнями, серед яких обчислювальна продуктивність задіяних процесорів, надійність зв'язку, можливість протоколів зв'язку забезпечувати належну комунікацію між агентами [7];

- **протоколи зв'язку.** Мережі роїв БпЛА часто класифікують як літальні спеціальні мережі (flying ad-hoc networks, FANET), які є підкласом мобільних спеціальних мереж (mobile ad-hoc networks, MANET) [61]. Протоколи зв'язку в роях БпЛА мають забезпечувати надійну передачу даних попри високу мобільність, динамічну топологію та обмежені ресурси (енергія, обчислювальна потужність). Зв'язок поділяється на U-T-U (UAV-to-UAV) — зв'язок між самими БпЛА для обміну інформацією, координатами, ходом місії і підтримки формації, та на U-T-I (UAV-to-Infrastructure) — зв'язок між БпЛА і центральним пунктом керування (наземною станцією) для отримання загальних команд та передачі даних місії. Ці протоколи маршрутизації адаптовані до MANET, але враховують специфіку FANET (високу швидкість і 3D-простір). Серед них виокремлюють такі протоколи: проактивні або табличні (destination-sequenced distance vector, DSDV); реактивні, коли зв'язок здійснюється на вимогу (ad-hoc on-demand distance vector, AODV, dynamic source routing, DSR); гібридні, що поєднують проактивну маршрутизацію всередині певної зони та реактивну між зонами (zone routing protocol, ZRP); географічні або позиційні, які використовують GPS-координати для маршрутизації для найближчого до цілі сусіда (greedy perimeter stateless routing, GPSR); специфічні для FANET (adaptive aero ad-hoc, A3, greedy-based three-dimensional ad-hoc routing, GyTAR), спеціально розроблені з урахуванням тривимірності простору та особливостей аеродинаміки;

- **протоколи керування мережею.** Окрім мережевих протоколів, для координації та керування рої використовують такі спеціальні протоколи: підтримки формації, які визначають для БпЛА відстань та місцеположення відносно інших БпЛА або лідера; розподілу завдань (task allocation), які на основі відповідних алгоритмів динамічно призначають цілі місії або її частини окремим БпЛА чи кластерам; запобігання зіткненням (collision avoidance), які формують рішення, що

базуються на даних від усіх чи сусідніх БпЛА; програмно-визначені мережі (SDN), які реалізують підхід, що відокремлює керування мережею від даних та дає змогу значно спростувати вирішення проблеми адаптації до швидких змін топології.

Способи позиціонування агентів рою БпЛА:

- **абсолютне позиціонування за допомогою супутникових систем (GNSS+RTK).** Визначення координат щодо зовнішньої системи, наприклад Землі, здійснюється на основі використання супутникових систем (GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou) [62]. Цей найпоширеніший метод забезпечує високу точність на відкритій місцевості, але його ефективність значно знижується в умовах міської забудови, лісів або через використання засобів РЕБ;

- **інерційна навігація (INS).** Цей спосіб використовує внутрішні датчики, такі як акселерометри та гіроскопи, для обчислення зміни місцеположення [63]. Хоча цей спосіб не залежить від зовнішніх сигналів, з часом накопичуються помилки, тому його зазвичай поєднують з іншими методами;

- **візуальна одометрія (visual odometry).** Агенти використовують свої камери для аналізу відеопотоку та визначення свого руху в навколишньому середовищі. Вони можуть ідентифікувати візуальні орієнтири, щоб точно розрахувати свою позицію [64];

- **сенсорне злиття (sensor fusion).** Це спосіб комбінування та доповнення даних із різних сенсорів і джерел інформації (камер, інерційних систем, ультразвукових або лазерних дальномірів) для отримання точнішого і надійнішого рішення щодо ведення рою [65];

- **радіочастотні методи.** Виокремлюють два таких методи: UWB (ultra-wideband), коли використовуються короткі радіоімпульси для точного вимірювання відстані між агентами, що дає змогу формувати взаємне позиціонування, та Wi-Fi / Bluetooth, який може застосовуватися для приблизного визначення відстані на основі сили сигналу (RSSI), хоча цей метод менш точний, ніж UWB [66, 67];

- **лазерні та ультразвукові дальноміри.** Вони використовуються для вимірювання відстані до інших агентів або об'єктів. Вони ефективні на невеликих дистанціях [68], що робить їх особливо корисними для підтримання конфігурації рою;

- **гібридні системи, що поєднують різні методи.** В деяких проектах використовують алгоритми поєднання даних від низки різнотипних сенсорів таких, як GNSS, IMU (inertial measurement unit), камери, лідари, RF-системи (radio frequency), які визначають фактори, що впливають на рух БпЛА, та силу впливу цих факторів на задану траєкторію рою [69–71]. Це дає змогу отримувати точніше, надійніше та стійке до завад рішення щодо позиціонування кожного БпЛА в рої, використовуючи, зокрема, підходи до локальної навігації [72]. Інший напрям — функціональний розподіл джерел інформації в рої, що застосовується в ієрархічних роях. Так, один дрон (лідер чи дрономатка) може використовувати GPS для абсолютного позиціонування, а інші (послідовники, підлеглі) орієнтуються щодо нього за допомогою відносних методів (наприклад, візуальної одометрії). Такий підхід забезпечує гнучкість і стійкість до втрати підлеглими дронами сигналу GPS, що є критично важливим для ефективного виконання складних місій дронів.

ВИСНОВКИ

Проблема планування місій роїв дронів, насамперед БпЛА, стає актуальнішою через розширення сфери застосування і підвищення складності задач, що виникають на практиці. В роботі проаналізовано низку термінів, які

стосуються місії груп дронів, подано схему функціонування роїв БПЛА під час реалізації поширених їхніх місій.

На основі аналізу накопиченого досвіду використання груп дронів та наявних перспектив їхнього застосування, відображеного в новітніх публікаціях, запропоновано систему характеристик роїв БПЛА, використання якої дає змогу класифікувати рої та сфери їхнього застосування.

Розв'язання основних задач, що виникають під час планування місій та використання роїв дронів, потребують розроблення нових математичних і програмно-алгоритмічних засобів та відповідних інформаційних технологій, базованих насамперед на розвинених алгоритмах оптимізації, комп'ютерного та штучного інтелекту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Li Y., Liu M., Jiang D. Application of unmanned aerial vehicles in logistics: A literature review. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, N 21. Article number 14473. <https://doi.org/10.3390/su142114473>.
2. Tang J., Duan H., Lao S. Swarm intelligence algorithms for multiple unmanned aerial vehicles collaboration: A comprehensive review. *Artif Intell Rev*. 2023. Vol. 56. P. 4295–4327. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10281-7>.
3. Bakirci M., Цзер M.M. Involvement of unmanned aerial vehicles and swarm intelligence in future modern warfare: An overview. Гарсна Мбрquez F.P., Jamil A., Ramirez I.S., Eken S., Hameed A.A. (eds.). *Computing, Internet of Things and Data Analytics. ICCIDA 2023. Studies in Computational Intelligence*. Springer, Cham. 2024. Vol. 1145. P. 58–67. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53717-2_6.
4. Wu Q., Su Y., Tan W. et al. UAV path planning trends from 2000 to 2024: A bibliometric analysis and visualization. *Drones*. 2025. Vol. 9, N 2. Article number 128. <https://doi.org/10.3390/drones9020128>.
5. Xin H., Dang F., Wang J. et al. Analysis of UAV swarm combat technology development trend. Zhu Z.H., Wei X., Li R. (eds.). *Trends in Advanced Unmanned Aerial Systems. ICAUAS 2024. Springer Aerospace Technology*. Springer, Singapore. 2025. P. 80–86. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3240-4_9.
6. Alqudsi Y., Makaraci M. UAV swarms: research, challenges, and future directions. *J. Eng. Appl. Sci*. 2025. Vol. 72. Article number 12. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00582-3>.
7. Trinh M.L., Nguyen D.T., Dinh L.Q. et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) networking algorithms: Communication, control, and ai-based approaches. *Algorithms*. 2025. Vol. 18, N 5. Article number 244. <https://doi.org/10.3390/a18050244>.
8. Ekechi C.C., Elfouly T., Alouani A., Khattab T. A survey on UAV control with multi-agent reinforcement learning. *Drones*. 2025. Vol. 9, N 7. Article number 484. <https://doi.org/10.3390/drones9070484>.
9. Al-Iqubaydhi N., Alenezi A., Alanazi T. et al. Deep learning for unmanned aerial vehicles detection: A review. *Computer Science Review*. 2024. Vol. 51. Article number 100614. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.100614>.
10. Puente-Castro A., Rivero D., Pedrosa E. et al. Q-learning based system for path planning with unmanned aerial vehicles swarms in obstacle environments. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 235. Article number 121240.
11. Letichevskii A.A., Kapitonova Y.V., Volkov V.A. et al. Insertion Programming. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2003. Vol. 39, N 1. P. 16–26. <https://doi.org/10.1023/A:1023812824070>.
12. Fedorovich O., Krytskyi D., Hubka O., Popov A. Modeling the series of military actions to plan an attack mission of a swarm drones. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. N 2. P. 46–63. <https://doi.org/10.32620/reks.2025.2.03>.

13. Gargalakos M. The role of unmanned aerial vehicles in military communications: application scenarios, current trends, and beyond. *J. Def. Model. Simul.* 2024. Vol. 21, N 3. P. 313–321. <https://doi.org/10.1177/15485129211031668>.
14. Zhai L., Wu H., Lai L., Gao Z. Intelligent optimization algorithms for multi-UAV path planning: A comprehensive review. *IEEE Access.* 2025. Vol. 13. P. 101106–101130. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3577598>.
15. Mohamed A., Mohamed M. Unmanned aerial vehicles in last-mile parcel delivery: A state-of-the-art review. *Drones.* 2025. Vol. 9, N 6. Article number 413. <https://doi.org/10.3390/drones9060413>.
16. Horbulin V.P., Hulianytskyi L.F., Sergienko I.V. Optimization of UAV team routes in the presence of alternative and dynamic depots. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2020. Vol. 56, N 2. P. 195–203. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00235-8>.
17. Sanchez-Wells D., Gonzalez-R P.L., Andrade-Pineda J.L. Cooperative use of truck—multi-trip drones in last-mile logistics combined operations: A brief review. Garcna Mórquez F.P., Segovia Ramirez I., Bernalte Sónchez P.J., Mucoz del Rño A., Peco Chacyn A.M. (eds.). *Internet of Things and Data Science in Engineering Management. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering.* Springer, Cham. 2026. P. 103–113. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92251-0_7.
18. Gremlins Program Demonstrates Airborne Recovery. URL: <https://www.darpa.mil/news/2021/gremlins-airborne-recovery> (відвідано 21.07.2025).
19. Luo H., Duan J., Wang G. Mathematical models for truck-drone routing problem: Literature review. *Applied Mathematical Modelling.* 2025. Vol. 144. Article number 116074. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.116074>.
20. Sadok A., Euch J., Siarry P. Vehicle routing with multiple UAVs for the last-mile logistics distribution problem: hybrid distributed optimization. *Ann Oper Res.* 2025. Vol. 351. P. 59–99. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06019-z>.
21. Rashid Nazir H.M., Sun Y., Hu Y. Optimized collaborative routing for UAVs and ground vehicles in integrated logistics systems. *Drones.* 2025. Vol. 9, N 8. Article number 538. <https://doi.org/10.3390/drones9080538>.
22. Horbulin V.P., Hulianytskyi L.F., Sergienko I.V. Planning of logistics missions of the «UAV+Vehicle» hybrid systems. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2023. Vol. 59, N 5. P. 733–742. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00609-8>.
23. Hulianytskyi L., Rybalchenko O. Optimization of decisions when planning a UAV group mission with alternative depots. *Selected Papers of the III International Scientific Symposium «Intelligent Solutions» (IntSol–2023). Symposium Proceedings. (27–28 September, 2023, Kyiv, Ukraine). CEUR Workshop Proceedings.* 2023. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3538/Paper_22.pdf.
24. Hulianytskyi L., Byshovets N., Zhdanova O. About the problem of drone routing. *Cybernetics and Computer Technologies.* 2024. N 3. P. 34–47. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.24.3.4>.
25. Adoni W.Y.H., Fareedh J.S., Lorenz S. et al. Intelligent swarm: Concept, design and validation of self-organized UAVs based on leader–followers paradigm for autonomous mission planning. *Drones.* 2024. Vol. 8, N 10. Article number 575. <https://doi.org/10.3390/10.3390/drones8100575>.
26. Spanogianopoulos S., Ahiska K. Positioning solution for heterogeneous swarm of UAVs and MAVs in 3D crowded environment. *Int. J. Dynam. Control.* 2025. Vol. 13. Article number 147. doi.org/10.1007/s40435-025-01656-z.
27. Varadharajan V.S., Soma K., Dyanatkar S., Lajoie P.Y., Beltrame G. Hierarchies define the scalability of robot swarms. 2024. arXiv preprint arXiv:2405.02417. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.02417>.
28. De Sa D.F.S. Neto J.V.D.F. Multi-agent collision avoidance system based on centralization and decentralization control for UAV applications. *IEEE Access.* 2023. Vol. 11. P. 7031–7042. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3235595>.

29. Zong Y., Chen L., Canyelles-Pericas P., Lu N., Jiang B. Resilient time synchronisation for aerial swarms by distributed graph neural networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2025. Vol. 13. P. 179–193. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2025.3582388>.
30. Changhui B. et al. Digital twin platform for real-time data communication in UAV environment. *Future Generation Computer Systems*, 2026. Vol. 175. Article number 108078. <https://doi.org/10.1016/j.future.2025.108078>.
31. Abro G.E.M., Abdallah A.M. Digital twins and control theory: A critical review on revolutionizing quadrotor UAVs. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 43291–43307. <https://doi.org/10.1016/j.future.2025.108078>.
32. Yanmaz E., Balanji H.M., Güven I. Dynamic multi-UAV path planning for multi-target search and connectivity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2024. Vol. 73, N 7. P. 10516–10528. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3363840>.
33. Мороз Б., Круглик А. Проблеми застосування груп безпілотних літальних апаратів. Концептуальні засади їх вирішення. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2024. Вип. 56. С. 220–225. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-28>.
34. Qi Y., Jiang H., Huang G. et al. Multi-UAV path planning considering multiple energy consumptions via an improved bee foraging learning particle swarm optimization algorithm. *Sci Rep*. 2025. Vol. 15. Article number 14755. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99001-z>.
35. Liu C., Yu H., Chen N., Shen B., Cai H. UAV-Mesh: A graph-based decentralized service mesh framework for UAV swarms. *2025 IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*. IEEE. 2025. P. 538–544. <https://doi.org/10.1109/ICWS67624.2025.00075>.
36. Kuru K. Swarms of autonomous drones in logistics within smart city: Opportunities, Challenges and Future Directions. *3rd International Conference on Logistics Engineering, Supply Chain and Digital Transformation*. (28–30 November, 2025, Zhengzhou, China). 2025. URL: <https://clouk.uclan.ac.uk/id/eprint/54199/>.
37. Amirteimoori A., Kia R., Mohamed M., Weber G.W. An innovative framework integrating MILP and a parallel optimal algorithm for UAV-Enabled last-Mile delivery. *International Journal of Production Research*. 2025. P. 1–21. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2557530>.
38. Granadeno P.A.A., Cleland-Huang J. Land-coverage aware path-planning for multi-UAV swarms in search and rescue scenarios. arXiv preprint arXiv:2505.08060. 2025.
39. Zhao L., Chen B., Hu F. Research on swarm control based on complementary collaboration of unmanned aerial vehicle swarms under complex conditions. *Drones*. 2025. Vol. 9, N 2. Article number 119. <https://doi.org/10.3390/drones9020119>.
40. Liu X., Jing T., Hou L. An FW–GA hybrid algorithm combined with clustering for UAV forest fire reconnaissance task assignment. *Mathematics*. 2023. Vol. 11, N 10. Article number 2400. <https://doi.org/10.3390/math11102400>.
41. Ali Z.A., Deng D., Shaikh M.K., Hasan R., Khan M.A. AI-Based UAV swarms for monitoring and disease identification of brassica plants using machine learning: A review. *Computer Systems Science & Engineering*. 2024. Vol. 48, N 1. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.041866>.
42. Suresh S., Velmurugan D., Vasudevan N., Samundi D.S.R., Elayaraja R. Autonomous UAV swarms: Innovations and applications. *Innovations and Developments in Unmanned Aerial Vehicles*. IGI Global Scientific Publishing. 2025. P. 95–128. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8462-6.ch005>.
43. Innovations and developments in unmanned aerial vehicles. Mellal M.A. (ed.). IGI Global Scientific Publishing. 2025. 586 p. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8462-6>.
44. Palmas A. Reinforcement learning for decision-level interception prioritization in drone swarm defense. arXiv preprint arXiv:2508.00641. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.00641>.
45. Novikov A., Yakovlev S., Gushchin I. Exploring the possibilities of MADDPG for UAV swarm control by simulating in pac-man environment. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. Vol. 2025, N 1(113). P. 327–337. <https://doi.org/10.32620/reks.2025.1.21>.

46. Deaconu A.M., Udriou R., Spridon D.E. Advances in cartography, mission planning, path search, and path following for drones. *Drones*. 2025. Vol. 9, N 10. Article number 677. <https://doi.org/10.3390/drones9100677>.
47. Slyusar V., Kozlov V., Pochernin S., Nalapko I. Conceptual foundations of the swarm employment of unmanned aerial vehicles as intelligent means of electronic warfare. *Technology audit and production reserves*. 2025. Vol. 3, N 2(83). P. 71–80. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.329989>.
48. Fan X., Li H., Chen Y., Dong D. UAV swarm search path planning method based on probability of containment. *Drones*. 2024. Vol. 8, N 4. Article number 132. <https://doi.org/10.3390/drones8040132>.
49. Zhang X., Zhao W., Liu C., Li J. Distributed multi-target search and surveillance mission planning for unmanned aerial vehicles in uncertain environments. *Drones*. 2023. Vol. 7, N 6. Article number 355. <https://doi.org/10.3390/drones7060355>.
50. Gonzalez-Jorge H., Aldao E., Fontenla-Carrera G., Veiga-Lopez F., Balvns E., Rhos-Otero E. Counter drone technology: A review. 2024. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.0551.v1>.
51. De Cubber G., Doroffei D., Petsioti P. et al. Standardized evaluation of counter-drone systems: methods, technologies, and performance metrics. *Drones*. 2025. Vol. 9, N 5. Article number 354. <https://doi.org/10.3390/drones9050354>.
52. Niu L., Wang Z., Lin Z. et al. Voxel-Based Navigation: A systematic review of techniques, applications, and challenges. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. Vol. 13, N 12. Article number 461. <https://doi.org/10.3390/ijgi13120461>.
53. Zhang C., Sun G., Wu Q. et al. UAV swarm-enabled collaborative secure relay communications with time-domain colluding eavesdropper. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024. Vol. 23, N 9. P. 8601–8619. <https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3350885>.
54. Leichenko K., Fesenko H., Kharchenko V., Illiashenko O. Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: Algorithms of finding the path for UAV placement. *Radioelectronic and computer systems*. 2024. N 1. P. 176–195. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.14>.
55. Zhang X., Jiang J. Formation tracking of UAV cluster systems based on disturbance observer. Yan L., Duan H., Deng Y. (eds.). *Advances in Guidance, Navigation and Control. ICGNC 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1344. Springer, Singapore. 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2228-3_23.
56. ITU-R M.2160. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond. International Telecommunication Union–Radiocommunication Sector (ITU-R): Geneva, Switzerland. 2023.
57. Arshid K., Krayani A., Marcenaro L., Gomez D.M., Regazzoni C. Toward autonomous UAV swarm navigation: A review of trajectory design paradigms. *Sensors*. 2025. Vol. 25, N 18. Article number 5877. <https://doi.org/10.3390/s25185877>.
58. Sarikaya B.S., Bahtiyar S. A survey on security of UAV and deep reinforcement learning. *Ad Hoc Networks*. 2024. Vol. 164. Article number 103642. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103642>.
59. Sun G., Xie W., Niyato D. et al. Generative ai for advanced UAV networking. *IEEE Network*. 2025. Vol. 39, N 4. P. 244–253. doi.org/10.1109/MNET.2024.3494862.
60. Zhang L., Hang L., Zu K., Wang Y. A smart contract-based algorithm for offline UAV task collaboration: A new solution for managing communication interruptions. *Future Generation Computer Systems*. 2026. Vol. 175. Article number 108078. <https://doi.org/10.1016/j.future.2025.108078>.
61. Bhatia T.K., Gilhotra S., Bhandari S.S., Suden R. Flying ad-hoc networks (FANETs): A review. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 2024. Vol. 11. Article number 4108. <https://doi.org/10.4108/ew.5489>.
62. Shanguan R., Lin L., Zhou Y. Overview of cooperative UAV swarm localization. *International Conference on Remote Sensing and Digital Earth (RSDE 2024). SPIE*. 2025. Vol. 13514. P. 238–242. <https://doi.org/10.1117/12.3059012>.

63. Yang X., Zhang M., Yan P. et al. Cross-path planning of UAV cluster low-altitude flight based on inertial navigation combined with GPS localization. *Electronics*. 2025. Vol. 14, N 14. Article number 2877. <https://doi.org/10.3390/electronics14142877>.
64. Xu H., Liu P., Chen X., Shen S. D2 SLAM: Decentralized and distributed collaborative visual-inertial SLAM system for aerial swarm. *IEEE Transactions on Robotics*. 2024. Vol. 40. P. 3445–3464. <https://doi.org/10.1109/TRO.2024.3422003>.
65. Opuz S., Heinrich M.K., Allwright M. et al. An open-source UAV platform for swarm robotics research: using cooperative sensor fusion for inter-robot tracking. *IEEE access*. 2024. Vol. 12. P. 43378–43395. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3378607>.
66. Lv M., Wang Y., Dong Y., Hu J., Xu Z. Multi-agent distributed cooperative localization based on ultra-wideband. *2025 IEEE 19th International Conference on Control & Automation (ICCA)*. IEEE. 2025. P. 385–390. <https://doi.org/10.1109/ICCA65672.2025.11129789>.
67. Loreti P., Crescenzi A., Bracciale L. et al. UAV localization using long-range ultra-wideband networks. *2025 IEEE 31st International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN)*. (07–08 July, 2025, Liile, France). 2025. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/LANMAN66415.2025.11154621>.
68. Rudyk A., Semenov A., Baraban S. et al. Influence of environmental factors on the accuracy of the ultrasonic rangefinder in a mobile robotic technical vision system. *Electronics*. 2025. Vol. 14, N 7. Article number 1393. <https://doi.org/10.3390/electronics14071393>.
69. Karci E.O., Kangal A.M., Önsü S. Improvement of cooperative localization for heterogeneous mobile robots. *Drones*. 2025. Vol. 9, N 7. Article number 507. <https://doi.org/10.3390/drones9070507>.
70. Cao Z., Chen G. Research on collaborative multi-UAV localization method based on combination navigation information. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2024. Vol. 238, N 21. P. 10426–10438. <https://doi.org/10.1177/09544062241263747>.
71. Huang Z. Research on cooperative navigation of UAVs based on multi-sensor fusion. *MATEC Web of Conferences*. 2025. Vol. 410. Article number 04007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202541004007>.
72. Hulianytskyi L., Ogurtsov M., Korolyov V., Rybalchenko O., Yarushevskiy O. The group movement optimization of autonomous agents in a locally-centric navigation model. *Proceedings of the International Workshop on Computational Intelligence (IWSCI 2025) co-located with the IV International Scientific Symposium "Intelligent Solutions" (IntSol 2025)*. (01–05 May, 2025 Kyiv–Uzhhorod, Ukraine). CEUR. 2025. Vol. 4036. P. 34–56. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4035/Paper4.pdf>.

L.F. Hulianytskyi

UAV SWARMS AND THEIR CHARACTERISTICS

Abstract. The article examines the key challenges in the planning and implementation of missions for UAV groups, primarily their swarms, and the main approaches to formulating and resolving the emerging problems, based on scientific publications of recent years. Definitions for a number of terms used in this field are proposed. Aspects of drone mission planning are considered, using the proposed system of swarm characteristics.

Keywords: UAV, drone group, drone team, UAV swarm, swarm mission planning, mission specialization

Надійшла до редакції 01.11.2025