

О. А. Середюк¹, І. М. Ключніков^{1,2}

¹ Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна

² Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

ГРУПОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ЗАСОБІВ: ВИКЛИКИ, РІШЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ХМАРНО-АГЕНТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та наземні роботизовані засоби (НРЗ) є актуальним трендом сьогодення. При цьому їх поодинокі застосування переходить до групового застосування, коли необхідно забезпечувати комунікацій та оптимальне використання ресурсів. **Предметом статті** є процеси групового застосування безпілотних літальних і наземних апаратів. **Мета статті** – проведення всебічного аналізу основних сфер застосування БПЛА і НРЗ, визначення методів оптимізації завдань для груп цих пристроїв, а також оцінка доцільності та перспектив впровадження хмарних технологій для розподілу завдань та оптимізації маршрутів. В **результаті роботи** визначено, що найбільш актуальними темами в галузі БПЛА та НРЗ є застосування хмарних технологій, інтеграція НРЗ у системи з БПЛА, розробка систем попередження пожеж та застосування методів машинного навчання. Вказані методи та технології активно застосовуються при вирішенні складних задач планування маршрутів та розподілу завдань у групах БПЛА та НРЗ. Але при цьому, недостатньо уваги приділяється впливу різноманітних погодних умов на роботу БПЛА та НРЗ, а також розрахунку надійності місії. Ці аспекти є критично важливими для практичного застосування безпілотних систем, особливо в складних умовах та при виконанні відповідальних завдань. розробці адаптивних алгоритмів, здатних враховувати динамічні зміни навколишнього середовища, та на створенні комплексних моделей оцінки надійності місії з урахуванням як технічних характеристик пристроїв, так і зовнішніх факторів. **Напрямок подальших досліджень** полягає у розробці адаптивних алгоритмів, здатних враховувати динамічні зміни навколишнього середовища, та створенні комплексних моделей оцінки надійності місії з урахуванням як технічних характеристик пристроїв, так і зовнішніх факторів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; безпілотні наземні транспортні засоби; групове застосування; огляд досліджень; сучасні технології.

Вступ

Постановка проблеми. Безпілотні літальні апарати та наземні роботизовані засоби стрімко розширюють сфери свого застосування, демонструючи неабияку ефективність у різноманітних галузях - від моніторингу об'єктів [1, 2] і ліквідації наслідків стихійних лих до військових операцій. Проте їх групове використання породжує низку викликів, зокрема оптимальний розподіл завдань та забезпечення надійної комунікації між пристроями.

Для вирішення цих проблем сучасні підходи базуються на застосуванні штучного інтелекту (ШІ) та передових алгоритмів. Нещодавні дослідження демонструють, що ШІ суттєво підвищує ефективність роїв БПЛА, оптимізуючи їхні маршрути та поведінку в різноманітних сценаріях [3]. Завдяки інтеграції алгоритмів ШІ, одна система або оператор може керувати всіма літальними апаратами, розраховуючи оптимальні маршрути для кожного з них.

У контексті оптимізації планування маршрутів БПЛА, гібридні алгоритми виявилися найефективнішими, перевершивши еволюційні та роеві підходи. Дослідники наголошують на важливості оптимізації часу в математичних моделях та врахуванні динамічного середовища, що відображає прагнення до підвищення обчислювальної ефективності та адаптації до реальних умов [4].

Концепція багатоагентних систем набуває все більшої популярності [5], розширюючи можливості взаємодії між різними типами безпілотних транспортних засобів. У цьому контексті БПЛА стають частиною складної мережі робототехнічних систем, що дозволяє проводити комплексні операції та взаємодії між БПЛА

та НРЗ. Дослідження в цій галузі зосереджуються на координації різноманітних агентів для досягнення спільних цілей, розширюючи оперативні можливості безпілотних систем у групових умовах [6].

Особлива увага приділяється стратегіям координації та стабільності для БПЛА та НРЗ. Інноваційні підходи до планування та стабілізації маршрутів дозволяють агентам ефективно взаємодіяти в складних середовищах без залежності від зовнішніх систем позиціонування. Методи оптичної локалізації відкривають нові можливості для тісної співпраці між роями БПЛА та НРЗ у динамічних умовах [7].

Систематичний огляд біологічно-натхненних алгоритмів для планування траєкторії польоту груп БПЛА, проведений у статті [8], охоплює літературу з 2013 по 2021 рік. Дослідники проаналізували широкий спектр підходів, включаючи метод рою часток (англ. Particle Swarm Optimization, PSO), генетичні алгоритми, оптимізацію сірого вовка (англ. Gray Wolf Optimization, GWO) та оптимізацію мурашиної колонії (англ. Optimization of Ant Colony, ACO). Алгоритми були класифіковані як оригінальні, вдосконалені та гібридні, з урахуванням факторів представлення середовища (2D та 3D), динамічності, методів уникнення зіткнень та специфічних сфер застосування. Результати показали, що PSO є найпоширенішим алгоритмом, а більшість досліджень зосереджені на вдосконалених версіях біологічно-натхненних алгоритмів для вирішення конкретних завдань планування траєкторій груп БПЛА.

Однак, обмежена обчислювальна потужність БПЛА та НРЗ може стати суттєвою перешкодою для ефективного розрахунку маршрутів та розподілу завдань. У цьому контексті перспективним рішенням є

застосування хмарних обчислювальних технологій. Вони дозволяють перенести ресурсоемі обчислення на віддалені сервери, оптимізуючи продуктивність та знижуючи вартість окремих пристроїв.

Мета статті полягає у всебічному аналізі основних сфер застосування БПЛА і НРЗ, вивченні методів оптимізації завдань для груп цих пристроїв, а також оцінці доцільності та перспектив впровадження хмарних технологій для розподілу завдань та оптимізації маршрутів. Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання дослідження:

- проведення порівняльного аналізу актуальних способів використання БПЛА та НРЗ у різних галузях;

- визначення найбільш поширених напрямів досліджень та алгоритмів оптимізації шляху БПЛА та НРЗ;

- обґрунтування доцільності застосування хмарних технологій для оптимізації маршрутів та способів взаємодії БПЛА і НРЗ, з урахуванням необхідності забезпечення надійності та впливу навколишнього середовища.

Виклад основного матеріалу

Методологія аналізу останніх досліджень і публікацій. Був проведений аналіз публічно доступних статей і досліджень у галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних наземних транспортних засобів (НРЗ). Основними джерелами для збору інформації були обрані авторитетні наукові платформи:

- ResearchGate – міжнародна соціальна мережа для науковців та дослідників.

- MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) – видавництво рецензованих наукових журналів відкритого доступу.

- SpringerLink – онлайн-платформа, що надає доступ до мільйонів наукових документів з журналів, книг та довідників, опублікованих видавництвом Springer Nature.

Дослідження охоплювало публікації за останні 5 років (2019-2024) для забезпечення актуальності інформації. Пошук здійснювався за такими ключовими словами та їх комбінаціями: uav path optimization; multi uav path; multi uav task offloading; multi uav cloud; multi uav fire; multi uav ugv. Кожне відібране дослідження було піддано глибокому аналізу. Для кожної статті було створено детальний опис, що включав основні результати, використані методології та ключові висновки. Особлива увага приділялася виділенню ключових слів, які відображали основні концепції, методи та технології, представлені в дослідженні. Для систематизації та ефективного управління зібраною інформацією було використано програму Obsidian. У цьому інструменті для кожного дослідження створювався окремий файл-анотація, що містив короткий опис дослідження, категорії (теги), посилання та іншу інформацію.

Аналіз частоти використання ключових слів дозволив виявити основні тенденції та напрямки досліджень у галузі. У табл. 1 представлено 10 ключових слів, що є найбільш згадуваними. Як видно з таблиці, найбільш актуальними темами досліджень є: застосування хмарних технологій; інтеграція НРЗ у системи

з БПЛА; розробка систем попередження пожеж; застосування нейронних мереж та інших методів машинного навчання.

Таблиця 1 – Ключові слова в публікаціях, що є найбільш згадуваними

Ключове слово	Кількість публікацій
UAV (unmanned aerial vehicle)	44
Multi-UAV	27
Cloud	11
A-star-algorithm	6
Particle-swarm-optimization	6
UGV(unmanned ground vehicle)	6
Fire-prevention	5
Neural-network	4
Review	4
Task-offloading	4

Окремо було проаналізовано популярність різних алгоритмів, що використовуються в дослідженнях БПЛА та НРЗ. Результати цього аналізу представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Алгоритми, що зустрічаються в дослідженнях

Алгоритм	Кількість публікацій
A-star-algorithm	6
Particle-swarm-optimization	6
Genetical-algorithm	3
Ant-colony-optimization	2
Gray-wolf-optimization	2
Bee-colony-algorithm	1
Cuckoo-search-algorithm	1
Floyd-warshall-algorithm	1
Nearest-neighbor-algorithm	1
Voronoi-algorithm	1

Найбільш популярними виявилися: алгоритм A* (A-star); оптимізація методом рою часток (Particle Swarm Optimization); генетичні алгоритми.

Ці алгоритми широко застосовуються для оптимізації маршрутів, планування завдань та вирішення інших складних проблем у сфері БПЛА та НРЗ.

Для кращого розуміння тенденцій у використанні БПЛА було створено діаграму (рис. 1), яка ілюструє співвідношення досліджень, що фокусуються на використанні одиночних БПЛА та груп БПЛА. Як видно з рис. 1, більшість досліджень фокусуються у напрямку використання БПЛА у групах. На рис. 2 наведено основні напрями досліджень, в рамках яких велися розглянуті роботи.

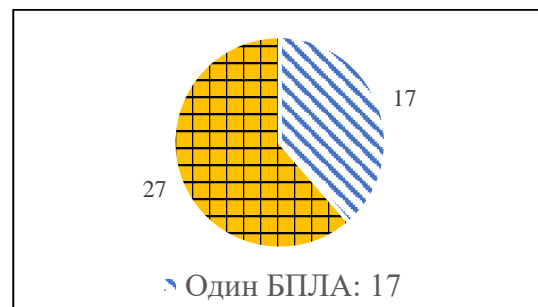


Рис. 1. Способи використання БПЛА (кількість досліджень)

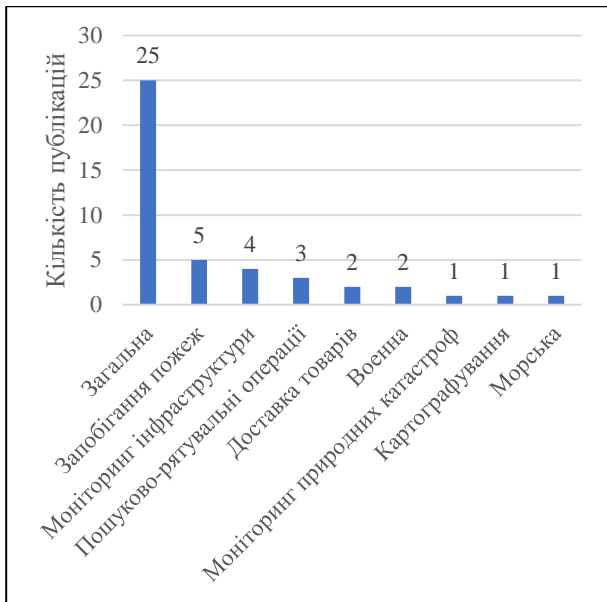


Рис. 2. Поділ досліджень на сфери використання і застосування БПЛА

Більшість розглянутого матеріалу стосується таких загальних питань як оптимізація шляху, часу роботи і розподілу задач для БПЛА. Інші популярні сфери застосування БПЛА та НРЗ це моніторинг та запобігання пожеж, моніторинг інфраструктури та рятувально-пошукові операції.

Для визначення актуальності та сучасності проаналізованих досліджень було проведено аналіз років

публікацій статей. Результати цього аналізу представлені на рис. 3.

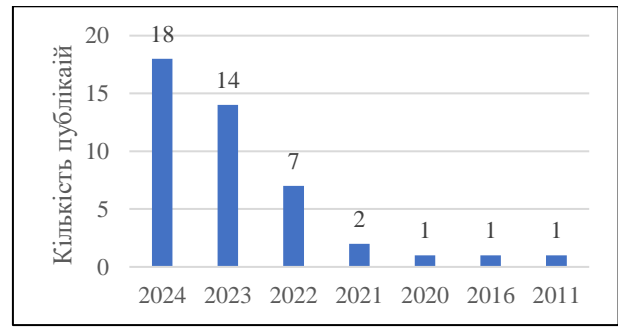


Рис. 3. Розподіл публікацій за роками

Як видно з графіку, переважна більшість проаналізованих статей була опублікована в період 2022-2024 років. Це свідчить про високу актуальність проведеного дослідження та його фокус на найновіших розробках та тенденціях у галузі БПЛА та НРЗ.

Для глибшого розуміння взаємозв'язків між різними дослідженнями та ключовими концепціями було створено граф зв'язків за допомогою програми Obsidian (рис. 4). Це дозволило візуально представити складну мережу взаємозв'язків між різними аспектами досліджень у сфері БПЛА та НРЗ. На створеному графі світлі крапки представляють ключові слова, відображаючи основні концепції та технології. Темні крапки відповідають описам окремих статей, представляючи конкретні дослідження.

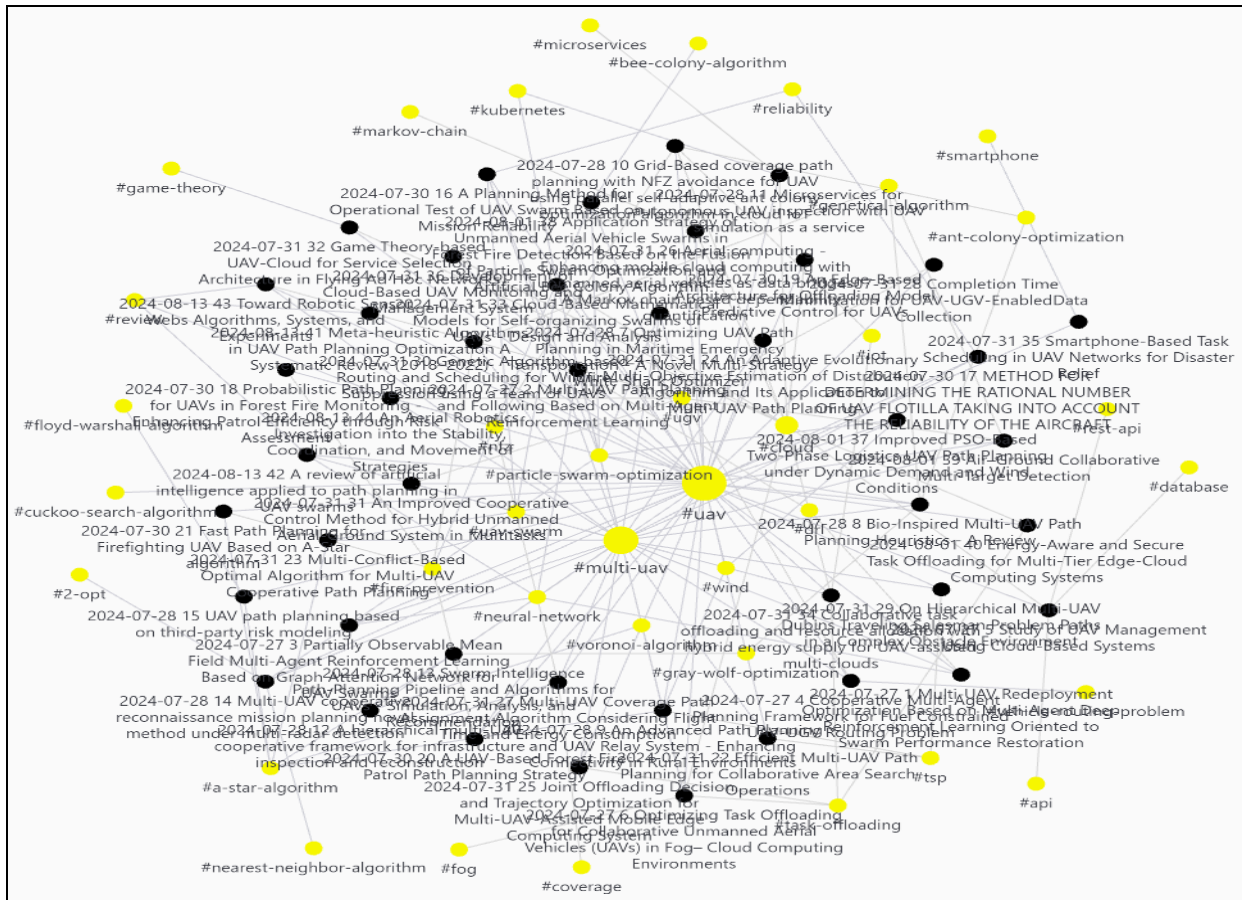


Рис. 4. Граф зв'язків концепцій та посилань

Аналіз графу дозволив виявити найбільш поширені та взаємопов'язані теми досліджень, окрім безпосередньо БПЛА та НРЗ:

- Cloud (хмарні технології): відображає зростаючу роль хмарних обчислень у керуванні та оптимізації роботи безпілотних систем.

- Particle Swarm Optimization (оптимізація роєм частинок): популярний алгоритм для вирішення задач оптимізації, особливо в контексті планування маршрутів та розподілу завдань для груп БПЛА.

- A Star Algorithm (алгоритм A*): широко використовується для ефективного планування шляху та навігації БПЛА та НРЗ у складних середовищах.

- Neural network (нейронні мережі): відображає зростаюче застосування методів машинного навчання для покращення автономності та адаптивності безпілотних систем.

- Task offloading (розподіл задач): ключова концепція для оптимізації роботи груп БПЛА та НРЗ, особливо в контексті обмежених обчислювальних ресурсів окремих пристроїв.

- Genetical algorithm (генетичний алгоритм): ще один популярний метод оптимізації, часто використовуваний для вирішення складних задач планування та розподілу ресурсів у системах БПЛА та НРЗ.

Нижче представлені ключові результати досліджень, представлених в публікаціях, які згруповані по завданням, що розв'язуються, та технологіям, що використовуються.

Оптимізація маршрутів руху. У цій частині розглянуто дослідження, присвячені розробці та вдосконаленню алгоритмів оптимізації траєкторій руху БПЛА. Основну увагу було приділено роботам, які пропонують інноваційні рішення для специфічних сценаріїв застосування безпілотників.

Алгоритм роєвого інтелекту Directional Drive-Rotation Invariant Quadratic Interpolation White Shark Optimization (DD-RQIWSO) для планування траєкторії морського БПЛА представлений у [9]. Він включає кілька стратегій для вдосконалення оригінального алгоритму White Shark Optimizer (WSO). Розроблена модель морського середовища враховує перешкоди та вплив вітру, використовуючи вихрову модель Ламба-Осена. Масштабні експерименти в 2D і 3D віртуальних середовищах порівнюють DD-RQIWSO з чотирма іншими передовими алгоритмами: Spider Wasp Optimizer (SWO), Reptile Search Algorithm (RSA), Autonomous Groups Particle Swarm Optimization (AGPSO) та оригінальним WSO. Результати демонструють перевагу DD-RQIWSO за якістю шляху та стабільністю в різних тестових випадках. Хоча стаття містить детальний аналіз впливу вітру на шлях БПЛА, інші погодні умови, такі як опади, не розглядаються.

Паралельний самоадаптивний алгоритм оптимізації мурашиної колонії (англ. Parallel Self-Adaptive Ant Colony Optimization Algorithm, PSAACO) для планування шляху БПЛА з урахуванням зон, заборонених для польотів (англ. No-Fly Zone, NFZ), запропоновано в [10]. Автори використовують метод на основі сітки для відображення картографічної області та маркування ключових точок, а також представляють динамічний алгоритм Флойда для ефективного уникнення

NFZ. Оцінка підходу проводиться за метриками часу виконання місії та споживання енергії, порівнюючи його з алгоритмами Back-and-Forth, Spiral та Wavefront. Хоча автори згадують доцільність використання хмарних серверів для складних завдань планування шляху, конкретні деталі застосованих хмарних технологій не надаються.

Автори дослідження [11] пропонують комплексний метод планування маршруту БПЛА з урахуванням ризиків та витрат для міських середовищ. Вони розробляють модель ризиків для оцінки небезпек польотів БПЛА у містах, яка включає ризик перешкод, ризик смерті та ризик втрати майна. Дослідники представляють алгоритм Min-cost A* на основі традиційного алгоритму A*. Вони також застосовують вдосконалений алгоритм Флойда для згладжування згенерованого маршруту з низьким ризиком. Ефективність їхнього підходу демонструється за допомогою симуляцій на міській території площею 1 км × 1 км у місті Сіань, Китай, показуючи, що алгоритм Min-cost A* зменшує ризик маршруту на 44,44% порівняно з традиційним алгоритмом A*.

У дослідженні [12] представлено інноваційний алгоритм планування траєкторії польоту БПЛА для реагування на аварії на магістральних нафто- та газопроводах на великих відстанях. Особливість цього підходу полягає в урахуванні помилок позиціонування, що критично важливо для точності операцій. Автори розробили модель, яка оптимізує загальну траєкторію польоту, дотримуючись обмежень на виправлення помилок. Для швидкого планування оптимальної траєкторії використовується модифікований алгоритм A-Star з адаптованою відстанню Ейлера як оціночною функцією вартості. Ефективність методу була продемонстрована через моделювання з використанням реальних даних з конкретної польотної зони. Порівняльний аналіз показав перевагу запропонованого підходу над алгоритмом Дейкстри як з точки зору ефективності, так і часу обчислень, що підкреслює його потенціал для практичного застосування в складних умовах.

Авторами в [13] пропонується новаторський підхід до проведення аварійно-рятувальних операцій з використанням БПЛА та смартфонів. Основна ідея полягає у вирішенні проблеми обмежених ресурсів БПЛА шляхом передачі ресурсоємних завдань з обробки даних на смартфони, які мають більшу обчислювальну потужність. Для оптимізації цього процесу автори розробили багатоцільовий мутаційно-імунний алгоритм кажана (англ. Multi-Objective Mutation-Immune Bat, MOMIB), який є гібридом алгоритму кажана та імунного алгоритму. Цей інноваційний підхід був ретельно протестований в масштабних симуляційних експериментах, які моделювали сценарії катастроф різного ступеня складності. Результати показали значну ефективність запропонованого методу порівняно з традиційними підходами, що відкриває нові перспективи для підвищення ефективності рятувальних операцій з використанням БПЛА в умовах обмежених ресурсів.

Групове застосування. БПЛА також можуть виконувати завдання у групах. В цьому розділі були

розглянуті дослідження, що фокусуються на оптимізації шляхів та задач для декількох БПЛА. Так, наприклад, в дослідженні [14] пропонується використовувати групи БПЛА для оптимізації планування ретрансляційних маршрутів в гірській місцевості з метою покращення покриття зв'язку для пошуково-рятувальних операцій. Автори дослідження використовують модель поширення Лонглі-Райса для визначення зон з поганим покриттям сигналу, які потім позначаються як точки інтересу. Автори вирішують задачу комівояжера для оптимізації послідовності відвідування точок інтересу, а потім застосовують алгоритм пошуку A^* для планування маршруту, який враховує висоту місцевості та обмеження покриття. Підхід також враховує такі фактори як енергозбереження та вітростійкість, розраховуючи швидкість БПЛА в залежності від погодних умов для оптимізації часу роботи акумулятора. Але статті бракує детального опису надійності та стійкості системи в різних погодних умовах.

БПЛА також може використовуватися для огляду і реконструкції об'єктів інфраструктури. Розроблена у дослідженні [15] система складається з двох етапів: розвідки та експлуатації, спрямованих на збалансування робочого навантаження і скорочення загального часу виконання завдань. Дослідники впроваджують метод побудови карти щільності, який надає як глобальну, так і локальну інформацію для планування та виконання місії з моніторингу на основі БПЛА у режимі реального часу. Вони також впроваджують динамічний алгоритм на основі діаграми Вороного для рівномірного розподілу завдань між декількома БПЛА. Автори підкріпили свій підхід симуляціями в різних середовищах і тестами в реальних умовах, продемонструвавши покращену часову ефективність і надійність порівняно з існуючими методами. Але автори не розглядають питання оптимізації енергоспоживання і часу автономної роботи БПЛА, що може мати вирішальне значення при виконанні тривалих завдань з моніторингу.

У статті [16] автори досліджують багатоагентне планування маршруту для БПЛА в незнайомому середовищі з невідомими статичними перешкодами. Вони розробили уніфікований підхід для реалізації та аналізу трьох найсучасніших підходів: Multi-Agent Deterministic Policy Gradient (MADPG), Hybrid Simplified Grey Wolf Optimization with Modified Symbiotic Organism Search (HSGWO-MSOS) та покращений алгоритм Artificial Potential Field (APF). Дослідники створили 2D середовище для планування траєкторії БПЛА для моделювання кожного підходу, запустивши 450 симуляцій з різними розмірами рою БПЛА (3, 5 і 10 агентів) у трьох середовищах різної складності. Вони порівнюють продуктивність алгоритмів за показниками успішності, часу виконання та довжини шляху, використовуючи класичний A^* алгоритм як базовий. На основі своїх висновків автори надають рекомендації щодо оптимального використання кожного підходу до планування маршруту БПЛА, враховуючи складність середовища та швидкість доставки вантажу.

Автори дослідження [17] пропонують новий підхід до вирішення проблеми планування розвідуваль-

ної місії множини БПЛА (англ. Multi-UAV Cooperative Reconnaissance Mission Planning, MUCRMP) в контексті виявлення множиною радарів. Дослідники розробили модель оптимізації, спрямовану на мінімізацію відстані шляху БПЛА в межах діапазону виявлення радара, враховуючи такі фактори, як послідовність розвідки, відносне позиціонування щодо цілей та характеристики БПЛА. Автори розробляють покращений синтетичний евристичний алгоритм (англ. improved synthetic heuristic algorithm, ISHA) для вирішення цієї складної задачі, який поєднує алгоритм найближчого сусіда (англ. Nearest Neighbor Algorithm) та метод оптимізації 2-ОПТ. Запропонований метод тестується на задачі з 68 цільовими точками, демонструючи свою дієвість. Порівняно з існуючими алгоритмами, такими як адаптивний генетичний алгоритм (англ. adaptive genetic algorithm), метод рою часток (англ. particle swarm optimization) та оптимізація мурашиними колоніями (англ. ant colony optimization), ISHA показує покращені антирадарні характеристики для БПЛА та швидшу конвергенцію в конкретних розвідувальних місіях. Автори визнають, що вони не враховують того фактору, що параметри місії БПЛА можуть постійно змінюватися залежно від умов навколишнього середовища та часу польоту.

В дослідженні [18] була проведена оцінка та розробка алгоритмів ефективного планування маршрутів і розподілу завдань для декількох БПЛА, що виконують спільні операції з пошуку та моніторингу об'єктів. Вони представляють два основні алгоритми: алгоритм спільного пошуку декількох БПЛА на основі жадібного підходу (MUCS-GD) і алгоритм на основі бінарного пошуку з обмеженнями по споживанню енергії (MUCS-BSAE). Дослідники порівнюють ці алгоритми, використовуючи п'ять різних моделей шляху пошуку: зміїну криву, криву «прямокутного сигналу», криву Пеано, криву Гільберта і криву Мура. Вони проводять симуляції, щоб оцінити ефективність цих алгоритмів і траєкторій пошуку в різних сценаріях, враховуючи такі фактори, як споживання енергії, швидкість польоту і розмір території. Результати показують, що алгоритм MUCS-BSAE перевершує алгоритм MUCS-GD, покращуючи ефективність на 25,8%. Крім того, автори пропонують покращену версію MUCS-BSAE (IMUCS-BSAE) спеціально для кривої траєкторії «прямокутного сигналу», що додатково підвищує ефективність на 2%.

Алгоритм багатоконфліктного пошуку (MCBS) для спільного планування маршрутів декількох БПЛА у складних умовах, описаний в [19], враховує просторові та часові обмеження, включаючи обмеження польоту, вплив навколишнього середовища та вимоги до взаємодії між БПЛА. Розроблена тривимірна модель середовища включає географічну інформацію та різні типи загроз. MCBS використовує ієрархічний підхід з алгоритмом A^* для планування індивідуальних маршрутів та високорівневою системою вирішення конфліктів для взаємодії БПЛА. Алгоритм запроваджує пріоритетну обробку конфліктів, модифікований метод росту дерева обмежень та нову евристичну функцію. Результати досліджень підтвердили ефективність алгоритму в пошуку оптимальних безпечних маршрутів.

Адаптивний еволюційний багатоцільовий алгоритм оцінки розподілу (АЕМО-EDA), представлений в [20], вирішує проблему спільного планування маршрутів декількох БПЛА. Алгоритм був протестований на еталонних задачах (DTLZ і WFG) та порівняний з іншими сучасними алгоритмами, такими як NSGA-III, RVEA і NSGAIII-GBFE. Моделювання сценаріїв планування траєкторії польоту декількох БПЛА продемонструвало ефективність підходу в уникненні загроз і одночасній оптимізації декількох задач.

Дослідження [21] пропонує метод оптимізації для спільного прийняття рішень щодо розподілу навантаження та планування траєкторії в системі мобільних периферійних обчислень (англ. Mobile Edge Computing, MEC) з декількома БПЛА. Задача сформульована як мінімізація суми затримок та споживання енергії з урахуванням обмежень на область польоту БПЛА, уникнення зіткнень та обчислювальну потужність. Для оптимізації траєкторій БПЛА розроблено алгоритм Simulated Annealing-Beetle Antennae Search (SA-BAS), який поєднує методи Simulated Annealing і Beetle Antennae Search. Численні симуляції підтвердили ефективність запропонованої схеми в мінімізації затримки та енергоспоживання порівняно з іншими алгоритмами.

Проблема планування покриття для декількох БПЛА у складних умовах із забороненими для польотів зонами розглядається в [22]. Запропоновано два алгоритми: MBS-MUCCPPAFOA (Multi-base station Multi-UAV Cooperative Coverage Path Planning Algorithm with Flexible Obstacle Avoidance Ability) та MUAV-CCPPAFOA-AS (Multi-UAV Cooperative Coverage Path Planning Algorithm with Flexible Obstacle Avoidance Capability based on Area Segmentation), спрямовані на підвищення ефективності та енергоспоживання роїв БПЛА при виконанні завдань з покриття території. Алгоритм A* використовується для обходу перешкод. Імітаційні експерименти порівнюють запропоновані алгоритми з базовим алгоритмом планування покриття при різних розмірах робочої зони і складності навколишнього середовища. Однак, не розглядаються потенційні обмеження алгоритмів у реальних сценаріях та питання обмеження зв'язку між БПЛА і базовими станціями.

Рішення ієрархічної задачі комівояжера Дубіна (англ. hierarchical multi-UAV Dubins traveling salesman problem, HMDTSP) в складному тривимірному середовищі з перешкодами представлено в [23]. Автори розробили алгоритм багатопроєкційної кластеризації з декількома БПЛА (англ. multi-UAV multilayer projection clustering, MMPC) для ефективної кластеризації терміналів зв'язку. Імітаційні експерименти підтверджують ефективність запропонованих стратегій у наданні реалістичних варіантів рішень для HMDTSP в складних середовищах з перешкодами.

Дослідження [24] фокусується на проблемі планування маршрутів БПЛА з врахуванням впливу вітру в інтелектуальних транспортних системах. Розроблена двофазна система планування маршрутів БПЛА включає розподіл часу, оновлення списку клієнтів і аналіз динаміки попиту. Вдосконалений алгоритм планування маршрутів на основі оптимізації

рою частинок (PSO) використовується для вирішення поставленої задачі. Масштабне чисельне моделювання з використанням модифікованого набору даних Solomon R201 продемонструвало покращення ефективності доставки вантажу та використання акумулятора БПЛА. Проте, у дослідженні відсутні порівняння запропонованого алгоритму з іншими алгоритмами планування маршрутів.

БПЛА також можуть використовуватися у групах з НРЗ. Дослідження [25] зосереджено на оптимізації маршрутів обох видів транспортних засобів для максимальної ефективності з урахуванням обмежень, таких як ємність акумулятора БПЛА та швидкість БНЗТ. Автори пропонують послідовну багатоагентну схему планування, що використовує мінімальне покриття множини (англ. Minimum Set Cover) для розподілу завдань та підхід на основі обчислювальної математики для вирішення задачі маршрутизації транспортних засобів з обмеженням енергії та часовими вікнами (англ. E-VRPTW). Ефективність схеми оцінюється за допомогою симуляцій в різних сценаріях, демонструючи потенційні переваги співпраці БПЛА та НРЗ з точки зору часу виконання завдання та споживання енергії. Однак, у статті не наведено достатньо інформації щодо обчислення надійності системи а також способів та методів комунікації між БПЛА та НРЗ.

У дослідженні [26] представлена система збору даних за допомогою БПЛА для бездротових сенсорних мереж, спрямована на мінімізацію часу виконання місії. Запропоновано дві стратегії співпраці: без інформаційної взаємодії та з нею. Проблема визначена як спільна оптимізація маршрутів БПЛА та НРЗ, об'єднання сенсорних вузлів та вибір стратегії з урахуванням обмежень енергоспоживання та висоти польоту. Розроблено багатапний алгоритм оптимізації, що поєднує методи опуклої оптимізації та генетичні алгоритми. Симуляції демонструють значне покращення часу завершення місії та енергоефективності порівняно з еталонними схемами. Однак дослідження недостатньо враховує реальні фактори навколишнього середовища, такі як перешкоди або погодні умови.

У статті [27] автори пропонують метод спільного управління складними багатозадачними процесами з використанням гібридної системи БПЛА/НРЗ у середовищі з великою площею. Підхід спрямований на мінімізацію витрат часу та енергії при виконанні поставлених завдань. Автори поділяють проблему на три етапи: визначення оптимального розташування ретрансляційних станцій для НРЗ за допомогою методу адаптивної кластеризації, розв'язання задачі планування траєкторії руху НРЗ за допомогою вдосконаленого алгоритму зозулі (англ. cuckoo search algorithm) та розподіл завдань між БПЛА за допомогою методу групування, що базується на вдосконаленому алгоритмі динамічного програмування. Метод протестовано за допомогою симуляцій простих і складних кооперативних завдань, що демонструє його ефективність у різних сценаріях. Автори також обговорюють ключові параметри та порівнюють свій підхід до розподілу завдань з оптимізацією рою частинок та жадібними методами, демонструючи кращі

показники з точки зору споживання енергії та часу виконання завдань.

Модель спільного повітряно-наземного виявлення декількох цілей на основі змішаного цілочисельного лінійного програмування (англ. Mixed Integer Linear Programmin, MILP) для координації БПЛА і НРЗ описана в дослідженні [28]. Вона включає в себе динамічне уникнення зіткнень, розподіл завдань та обмеження на об'їзд перешкод для симуляції реальних сценаріїв. Дослідники створили комплексну систему, яка враховує витрати часу, споживання енергії та плавність траєкторії. Для вирішення цієї складної оптимізаційної задачі вони представили новий метод, що поєднує алгоритм гілок і меж з покращеним генетичним алгоритмом (англ. Branch-and-Bound algorithm with an Improved Genetic Algorithm, IGA-V&B). Запропонований підхід перевірено за допомогою симуляцій у багатоагентному середовищі з багатьма перешкодами та додатково протестовано в реальних умовах. Результати показують, що метод IGA-V&B скорочує час обчислень на 30% порівняно з традиційним методом гілок і меж, зберігаючи при цьому якість рішення.

Нейронні мережі. Для оптимізації роботи групи БПЛА можуть бути використані нейронні мережі. У статті [29] розглядається проблема забезпечення надійності рою БПЛА, які виконують завдання з картографування місцевості. Під час виконання місії рій може втрачати БПЛА через фізичні пошкодження або вичерпання енергії, що зменшує покриття території. Для вирішення цієї проблеми автори пропонують новий метод, заснований на багатоагентному навчанні з підкріпленням (англ. Multi-Agent Deep Reinforcement Learning, MADRL). Кожен БПЛА розглядається як окремий агент, що приймає рішення на основі інформації про стан навколишнього середовища та інших агентів. Використання MADRL дозволяє рою навчатися оптимально розподіляти завдання між діючими БПЛА навіть в умовах втрат, що мінімізує зниження ефективності місії.

У дослідженні [30] пропонується новий підхід до планування маршрутів у багатоагентних системах. У ньому використовується глибоке навчання з підкріпленням (англ. Deep Reinforcement Learning) для забезпечення навігаційних можливостей БПЛА в складних середовищах на основі даних лазерного сканування. Ключовим нововведенням є інтеграція методу планування маршруту на основі вибірки, що підвищує ефективність. Запропонований метод також включає обмін параметрами між БПЛА для прискорення навчання та покращення продуктивності. Для вирішення проблем поведінки БПЛА введена ретельно розроблена функція винагороди.

У науковій статті [31] представлено інноваційний підхід до координації декількох БПЛА в умовах обмеженого зв'язку. Автори розробили новий алгоритм GPMF (англ. Graph attention network supported Partially observable Mean Field Multi-agent reinforcement learning), який об'єднує графові нейронні мережі та теорію середнього поля. Цей підхід ефективно враховує складні взаємодії між БПЛА та забезпечує ефективне прийняття рішень. Результати

експериментів показують перевагу GPMF над існуючими методами у складних кооперативних завданнях. Хоча стаття зосереджена на покращенні спільного прийняття рішень між БПЛА в умовах обмеженого діапазону зв'язку, вона не містить чітких стратегій для ситуацій повної втрати зв'язку або несправності БПЛА.

Хмарні технології. У цьому розділі було розглянуто дослідження, що фокусуються на використанні БПЛА та БТНЗ з хмарними технологіями. Основними напрямками досліджень є перенесення обчислювально важких завдань на хмарні сервери, що забезпечує підвищення ефективності місії.

Інтеграція БПЛА з технологією хмарних обчислень для створення більш ефективної та масштабованої системи для застосувань БПЛА є ключовою темою статті [32]. Автори пропонують структуру, яка використовує Ресурсно-орієнтовану архітектуру (ROA) та веб-сервіси на основі передачі репрезентативного стану (REST) для забезпечення універсального доступу до ресурсів і послуг БПЛА. Запропонована система включає брокерський рівень, який керує розподілом завдань відповідним БПЛА, забезпечуючи відокремлення клієнта від постачальників послуг. У статті детально описано реалізацію цієї структури, включаючи розробку ресурсів API та бази даних для зберігання інформації про БПЛА. Хоча автори оцінюють час відгуку системи та порівнюють її з традиційними методами однорангового RF-зв'язку, стаття має деякі недоліки. Зокрема, відсутність реального впровадження хмарної системи або детального концепту, а також бракує розрахунків надійності системи, комплексного аналізу продуктивності та енергоефективності БПЛА, що є важливими для підтвердження практичної життєздатності запропонованої концепції.

У статті [33] автори пропонують спільну стратегію розподілу (англ. collaborative offloading strategy) для застосувань БПЛА, яка використовує можливості туманої (англ. fog) та хмарної (англ. cloud) обчислювальних систем. Стратегія спрямована на мінімізацію затримок в комунікації та зменшення енергоспоживання безпілотників шляхом оптимізації розподілу обчислювальних ресурсів для кожного БПЛА. Результати дослідження показують, що їхній підхід може значно знизити затримку комунікації та загальне енергоспоживання вузлів системи порівняно з альтернативними стратегіями. Однак в статті відсутній аналіз надійності, який має вирішальне значення для застосування БПЛА в критичних сценаріях, і вона передбачає ідеальний зв'язок без урахування потенційних збоїв в комунікації між БПЛА, туманними вузлами і хмарними серверами.

Розробка та реалізація хмарної системи для автономної інспекції об'єктів інфраструктури за допомогою БПЛА розглядаються в статті [34]. У цій роботі автори представили додаток із мікросервісною архітектурою для високорівневого планування, моніторингу та тестування місії БПЛА, таких як перевірка ліній електропередач, веж, мостів та залізниць. Система використовує контейнеризацію та Kubernetes для розгортання, масштабування та управління,

з безперервною інтеграцією та розгортанням (англ. continuous integration and continuous deployment, CI/CD) через сервіс GitLab. Автори реалізували різні сервіси, включаючи веб-інтерфейс, оптимізатор маршрутів і симулятор БПЛА, щоб забезпечити планування місії, розрахунок маршрутів і моніторинг в реальному часі. Проведена оцінка продуктивності показала здатність системи справлятися зі зростаючим користувацьким навантаженням та підтримувати низький час відгуку завдяки масштабуванню сервісів. У подальшому розвитку системи автори планують створити окремий сервіс для визначення впливу погодних умов на маршрути БПЛА.

Метод планування автономних місій БПЛА, який передбачає перенесення обчислювально важких завдань на периферійні сервери, запропоновано в дослідженні [35]. Автори реалізували Model Predictive Controller (MPC) для керування траєкторією дрона Crazyflie, який має обмежені бортові обчислювальні можливості. Архітектура системи базується на Kubernetes, що забезпечує організацію розгортання контейнерних додатків, включаючи MPC та головну операційну систему ROS (Robot Operating System). У ході експериментів дослідники аналізували продуктивність системи при різних параметрах і швидкостях MPC, вимірюючи точність траєкторії, затримки в проходженні маршруту та загальну поведінку системи. Результати демонструють, що запропонована система здатна ефективно керувати БПЛА, коли високорівневий контролер руху працює на периферійному сервері, що відкриває можливість виконання більш складних автономних місій для БПЛА з обмеженими ресурсами.

Робота [36] представляє новий підхід до оцінки доступності та надійності систем мобільних хмарних обчислень (англ. Mobile Cloud Computing, MCC) з використанням БПЛА для повітряних обчислень. Автори розробили моделі безперервного часового марковського ланцюга (англ. Continuous Time Markov Chain, CTMC) для опису архітектури системи, що складається з мобільних пристроїв, БПЛА, базових станцій і хмарних серверів. У дослідженні представлено базову модель та дві розширені моделі, які включають стратегії гарячого і холодного резервування для підвищення надійності системи. Проведений аналіз показав, що розширені моделі значно підвищують доступність системи: модель гарячого резервування забезпечує 99,97% доступності і скорочує час простою на 62 години порівняно з базовою моделлю.

У статті [37] розглядається архітектура вибору послуг у БПЛА-хмарі на основі теорії ігор (англ. Game Theory-based UAV-cloud of Service Selection Architecture, GT-SSA), яка вирішує питання управління ресурсами та вибору послуг у хмарних середовищах для БПЛА. Запропонована архітектура використовує принципи теорії ігор для оптимізації прийняття рішень дронами-клієнтами (англ. Client Drones, CD) та дронами-провайдерами (англ. Provider Drones, PD), що підвищує ефективність вибору послуг у рамках Flying Ad hoc NETworks (FANETs). Для моделювання поведінки та комунікацій дронів автори реалізували GT-SSA за допомогою симулятора OMNeT++

4.6 та фреймворків INET і AVENS. Оцінка продуктивності архітектури проводилась за такими показниками, як затримка виявлення, затримка споживання, наскрізна затримка та споживання енергії, при цьому GT-SSA показала кращі результати порівняно з існуючими підходами, такими як GTCS.

У статті [38] автори презентують інноваційний підхід до вирішення проблем координації та управління роями БПЛА. Автори використовують математичну модель для керування рухом рою БПЛА та покращення захоплення зображень на напіввипадковій траєкторії польоту. У статті пропонується хмарна модель, яка використовує передові методи і алгоритми для розробки відмовостійких схем і побудови децентралізованого рою БПЛА. Для реалізації поставленої задачі вони використовують OpenStack та Kubernetes, що забезпечує надійну та ефективну продуктивність. Створена система також включає в себе OpenDroneMap для обробки аерофотознімків і використовує БПЛА, оснащені Raspberry Pi для збору даних. Запропоноване рішення є модульним і може бути адаптоване до різних сфер застосування.

У дослідженні [39] увага зосереджена на проблемі спільного розподілу завдань і ресурсів у мультимарній обчислювальній системі з використанням БПЛА для пристроїв Інтернету речей (англ. Internet of Things, IoT). Автори формулюють динамічну оптимізаційну задачу, спрямовану на мінімізацію енергоспоживання БПЛА при збереженні стабільності черги, враховуючи витрати на передачу даних і виконання завдань. Запропоновано алгоритм спільного розвантаження завдань і розподілу ресурсів (англ. Collaborative Task Offloading and Resources Allocation Algorithm, CTORAA), заснований на методах штучного інтелекту, що дозволяє ефективно вирішувати завдання розвантаження та збору енергії. Імітаційні експерименти підтвердили ефективність алгоритму, порівнюючи його з іншими підходами.

Авторами дослідження [40] було презентовано систему UAV Flight Tracker – хмарну систему для моніторингу та управління кількома БПЛА в режимі реального часу. Використання архітектури MEAN (MongoDB, ExpressJS, AngularJS та NodeJS) забезпечує масштабованість та ефективне відстеження, уникнення зіткнень і управління траєкторіями польоту. Алгоритм уникнення зіткнень реалізовано у трьох зонах: безпечна, перенаправлення та аварійна. Продуктивність системи оцінюється за такими параметрами, як час відгуку, використання ресурсів і ефективність уникнення зіткнень. Під час симуляцій з до 100 БПЛА аналізуються різні показники, включаючи час оновлення даних з датчиків і завершення місії. Результати підтверджують здатність системи до масштабування та ефективність в управлінні кількома БПЛА одночасно. Проте, бракує аналізу надійності та відмовостійкості системи, а також тестувань у реальних умовах з урахуванням впливу навколишнього середовища, таких як погодні умови.

У статті [41] автори пропонують енергоефективну і безпечну систему розподілу завдань для декількох БПЛА за допомогою периферійних хмарних обчислень (англ. Edge-Cloud Computing, ECC). Вони

формулюють оптимізаційну задачу, яка включає розподіл завдань і ресурсів, стиснення і забезпечення безпеки для мінімізації загального енергоспоживання в умовах обмежень на час затримки. Автори проводять оцінку своєї моделі за допомогою симуляцій в MATLAB, порівнюючи її з локальними, периферійними та хмарними стратегіями виконання, а також з іншими існуючими моделями розподілу завдань. Результати демонструють, що запропонована ними модель забезпечує значну економію енергії порівняно з еталонними рішеннями, з покращеннями від 12% до 21%.

Надійне виконання завдань. Щодо розрахунків надійності місії з використанням БПЛА було знайдено не так багато статей. У роботі [42] автори пропонують метод планування завдань для роїв БПЛА, орієнтований на забезпечення надійності виконання поставлених місій. Створено модель надійності для роїв, що виконують розвідувальні та бойові завдання, з урахуванням висоти польоту, площі покриття та загроз від противника. Для моделювання та розрахунку надійності місії на різних етапах – запуску, польоту та бойових дій – автори застосовують блок-схеми надійності, дерева відмов і двійкові діаграми прийняття рішень (англ. Binary Decision Diagrams, BDD). Оптимізація планів випробувань здійснюється за допомогою алгоритму багатоцільової оптимізації рою квантових частинок (англ. Multi-Objective Quantum Particle Swarm Optimization, MOQPSO), який враховує надійність і вартість місії. Метод демонструється на прикладі рою з розвідувальними і бойовими можливостями, підкреслюючи, як оптимальні плани польоту можуть бути обрані залежно від сценаріїв з відомим і невідомим місцезнаходженням ворожих цілей.

У дослідженні [43] запропоновано метод визначення оптимальної чисельності флотилій БПЛА, враховуючи надійність літальних апаратів і необхідну якість моніторингу у надзвичайних ситуаціях. Аналізуючи фактори, що впливають на структуру угруповання, автори встановили залежність ефективності виконання завдань від ймовірності відмови БПЛА під впливом негативних факторів. Використано теорію ризику, ймовірностей, комбінаторику, теорію надійності та методи математичної оптимізації для розробки моделі. Представлено структурну схему управління флотиліями БПЛА, яка враховує можливість самовідновлення системи в умовах деградації під впливом дестабілізуючих факторів та загроз. Крім того, розроблено математичну модель для оцінки якості управління угрупованням і сформульовано оптимізаційну задачу для максимізації продуктивності системи за наявності заданих обмежень. Однак у роботі бракує інформації щодо практичної реалізації та обмежень запропонованого методу.

Запобігання лісовим пожежам. Використання БПЛА та НРЗ у групах для запобігання лісовим пожежам є одним із найбільш розповсюджених напрямків сучасних досліджень. БПЛА та НРЗ можуть використовуватися для задач з моніторингу місцевості для запобігання подальшому розповсюдженню пожежі.

У статті [44] автори представляють алгоритм Probabilistic Path Planning (PPP) для БПЛА для покращення моніторингу та запобігання лісовим пожежам. Алгоритм поєднує інформацію про ймовірність виникнення пожежі в реальному часі з динамічним програмуванням для оптимізації маршрутів патрулювання БПЛА. Дослідники використовують логістичну регресію для розрахунку ймовірності пожежі на основі таких факторів навколишнього середовища, як температура, рівень вологості повітря і кількість опадів. Потім вони застосовують механізм фільтрації для видалення точок з низьким рівнем ризику і використовують метод динамічного програмування для створення оптимального маршруту патрулювання з урахуванням відстані та ймовірності пожежі. Ефективність алгоритму PPP оцінюється за допомогою симуляцій, порівнюючи його з традиційними методами, які враховують лише відстань. Результати показують, що запропонований метод скорочує час патрулювання на 18,5% та площу поширення пожежі на 23% порівняно з традиційними підходами. Хоча дослідження представляє новий підхід до моніторингу лісових пожеж за допомогою БПЛА, йому бракує аналізу надійності системи. Крім того, автори могли б дослідити потенційну інтеграцію методів машинного навчання для подальшого підвищення точності прогнозування пожеж.

Автори дослідження [45] пропонують метод планування маршрутів польотів БПЛА для моніторингу лісових пожеж з використанням карти ризиків лісових пожеж. Вони представляють підхід, заснований на визначенні маршруту патрулювання з урахуванням ризиків (RSUPP), який поєднує відстань, придатність для роботи на великих площах та інформацію про пожежну небезпеку для оптимізації маршрутів патрулювання БПЛА. Метод використовує алгоритм Gaussian mixture clustering для поділу великих територій на менші підзони, а потім використовує алгоритм Ring Self-Organizing Map (RSOM) для планування ефективних маршрутів польоту в межах кожної підзони. Автори також представляють схему кооперації декількох БПЛА для подолання обмежень патрулювання одним БПЛА великих лісових масивів. Вони оцінюють свій підхід у порівнянні з методами випадкового пошуку і локального пошуку, використовуючи практичний набір даних, демонструючи покращене покриття зон підвищеного ризику і скорочення загальної відстані польоту. Стаття включає дослідження національного лісового парку в Китаї, щоб проілюструвати застосування запропонованого ними методу. Але на жаль автори не розглядають потенційні обмеження, такі як вплив погодних умов на продуктивність БПЛА або інтеграцію оновлень даних в реальному часі в процес планування маршруту.

Для забезпечення швидкого реагування на лісові пожежі в статті [46] розроблено генетичний алгоритм маршрутизації та планування з часовими обмеженнями (англ. Genetic Algorithm-based Routing and Scheduling with Time constraints, GARST) із залученням групи БПЛА. Формулювання проблеми зводиться до задачі найкоротшого маршруту з часовими обмеженнями, що має на меті мінімізувати загальний

час ліквідації пожежі, забезпечуючи при цьому, що всі осередки пожежі будуть оброблені як окремі завдання для БПЛА (англ. Single UAV Tasks, SUTs). Алгоритм використовує генетичні оператори, такі як селекція, кросингвер, мутація та елітизм, для пошуку оптимальних або близьких до оптимальних рішень. Ефективність GARST підтверджена симуляціями з різною кількістю пожеж та аналізом методом Монте-Карло, показуючи високу успішність у сценаріях, де кількість випадків пожеж у 5 разів перевищує кількість БПЛА. Запропонований підхід перспективний для зменшення площі знищеної території та забезпечення швидкої ліквідації лісових пожеж. Проте, у роботі не проведено аналіз факторів навколишнього середовища, таких як швидкість та напрям вітру або рельєф, які можуть суттєво вплинути на продуктивність БПЛА в реальних умовах.

У статті [47] автори запропонували систематичну стратегію використання роїв БПЛА для виявлення та боротьби з лісовими пожежами. Розроблений підхід охоплює повний цикл — від виявлення осередків пожежі до аналізу та впровадження заходів контролю, базуючись на поєднанні алгоритмів оптимізації рою частинок (PSO) та штучної бджолиної колонії (англ. artificial bee colony, ABC). У тривимірному середовищі було змодельовано різноманітні сценарії лісових пожеж, враховуючи різні висоти гір, місця загоряння та площі пожежі. Алгоритм PSO використовується для ефективного планування маршрутів БПЛА з метою швидкого виявлення кількох точок загоряння, тоді як алгоритм ABC оцінює інтенсивність пожежі та пропонує відповідні заходи боротьби. Симуляції підтверджують ефективність підходу, демонструючи, як рої БПЛА можуть ефективно орієнтуватися на складній місцевості, виявляти декілька осередків пожежі та оцінювати їхню інтенсивність.

Результати аналізу публікацій. В ході аналізу 44 публікацій, які досліджують питання застосування БПЛА, встановлено, що лише у роботах [42] та [43] детально розглядаються питання надійності місії залежно від кількості БПЛА та інших важливих факторів. При цьому питання впливу вітру на траєкторії польоту БПЛА висвітлюється лише у дослідженнях [9], [14] та [24]. На жаль, дослідження впливу інших погодних умов, таких як дощ чи туман, не представлено в жодній з проаналізованих публікацій. Однак ці аспекти є критично важливими для пошуково-рятувальних операцій, де точність навігації та надійність місії мають ключове значення.

Більшість досліджень зосереджені на вдосконаленні алгоритмів оптимізації, таких як A*, PSO та генетичні алгоритми [4], [5], що дозволяє підвищити точність та ефективність планування маршрутів для БПЛА. Ці алгоритми активно використовуються для розв'язання задач оптимізації траєкторій польоту, забезпечуючи більш ефективне управління ресурсами і зменшення витрат часу на виконання завдань.

Нейронні мережі також демонструють значний потенціал у покращенні навігації БПЛА, завдяки їхній здатності до адаптивного навчання і прогнозування, як показано у дослідженні [30].

Аналіз показав, що більшість робіт акцентують на обмежених обчислювальних можливостях БПЛА та можливості перенесення частини функцій оптимізації шляхів до хмарних серверів [32], [33], [35]. Використання хмарних технологій дозволяє не лише поліпшити обробку погодних умов, завдяки інтеграції з сервісами погоди для корекції траєкторій польоту БПЛА [34], але і здійснити детальніший розрахунок надійності місії. Хмарні платформи здатні обробляти великі обсяги даних та виконувати складні обчислення, що є критично важливим для ефективного управління роями БПЛА в реальному часі. Це відкриває нові можливості для підвищення точності та надійності місії БПЛА, а також для адаптації до змінюваних умов навколишнього середовища.

Визначення напрямів подальших досліджень. У контексті стрімкого розвитку технологій БПЛА та мультиагентних систем постає потреба у вдосконаленні методів оптимізації розрахунків маршрутів і розподілу завдань. Ключовим напрямом майбутніх досліджень є інтеграція хмарних технологій та вдосконалених алгоритмів для підвищення ефективності планування і виконання місії БПЛА.

Одним з перспективних векторів розвитку є створення систем для оптимізації розрахунку шляхів у мультиагентних системах з урахуванням динамічних зовнішніх факторів, зокрема вітру та інших метеорологічних умов. Розробка адаптивних алгоритмів, здатних враховувати зміни погодних умов у реальному часі, набуває критичного значення. Це передбачає інтеграцію метеорологічних прогнозів та актуальних даних про атмосферні умови для оперативного коригування траєкторій польоту БПЛА.

Важливим аспектом є дослідження надійності місії у мультиагентних системах. Розробка моделей оцінки надійності, які враховують як технічні характеристики БПЛА, так і зовнішні фактори, дозволить забезпечити більш точне планування місії і мінімізувати ризик відмов. Це включає розрахунок надійності на різних етапах місії – від запуску до виконання завдань – з урахуванням потенційних збоїв у системах управління та комунікації.

Подальші дослідження можуть охоплювати аналіз сучасних хмарних технологій та платформ, таких як Azure, GCP, AWS, та можливості їх інтеграції з системами БПЛА.

На рис. 5 представлено схему взаємодії незалежних агентів. Кожен агент може бути фізичним НРЗ або БПЛА, оснащеним власним програмним забезпеченням (ПЗ). Це ПЗ дозволяє агентам оптимізувати свій маршрут та завдання залежно від стану середовища та інших агентів. Кількість агентів може варіюватися. Обмін інформацією між агентами на схемі позначено стрілочками. Перевагою цього підходу є автономність системи, що особливо цінним в умовах відсутності зв'язку.

Однак це збільшує обчислювальне навантаження на агентів, що підвищує вартість кожного БПЛА або НРЗ та енергоспоживання.

Рис. 6 ілюструє схему взаємодії агентів з використанням хмарних технологій. Агенти (фізичні елементи системи, БПЛА та НРЗ) комунікують з хмар-

ною системою через балансувач навантаження (Load balancer). Його функція – оптимальний розподіл навантаження і запитів від агентів між множиною копій ПЗ. Ці копії ПЗ зазвичай розгортаються у контейнерах за допомогою таких інструментів, як Docker та Kubernetes [48]. Кількість агентів і копій ПЗ може бути різною, а балансувач навантаження здатний динамічно змінювати кількість контейнерів ПЗ. Схема також відображає взаємодію ПЗ з базою даних (БД) та зовнішнім сервісом погоди.

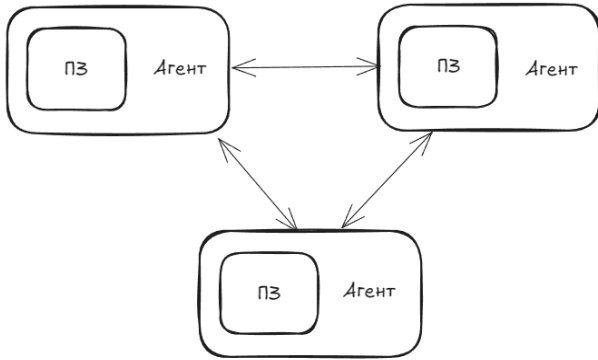


Рис. 5. Схема взаємодії незалежних агентів

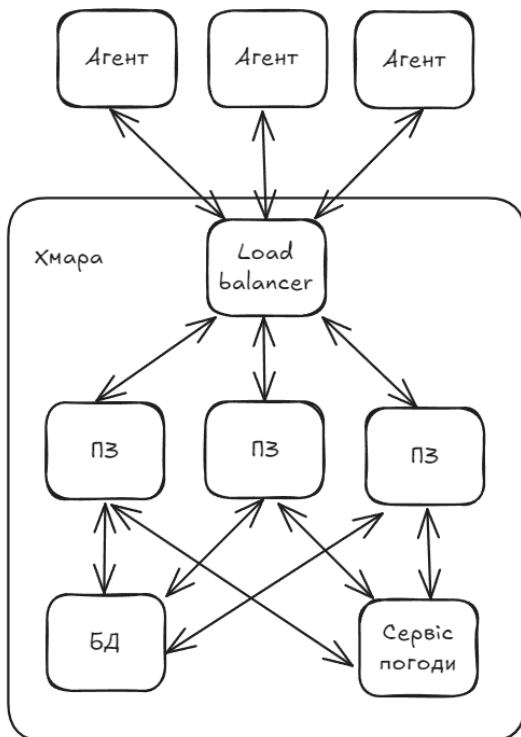


Рис. 6. Запропонована схема взаємодії агентів з хмарним середовищем

Перевагою такого підходу є перенесення обчислень у хмарне середовище, що знижує вартість експлуатації агентів. Недоліком може бути вразливість до перебоїв або повної втрати зв'язку з хмарним середовищем.

Проте це не виключає можливості комбінування даного підходу з попереднім для досягнення оптимального балансу між автономністю та ефективністю.

Висновки

У ході дослідження було проаналізовано 44 наукові публікації за період з 2019 по 2024 роки, присвячені оптимізації роботи безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних наземних транспортних засобів (НРЗ) з використанням хмарних технологій. Цей аналіз дозволив виконати поставлені завдання та досягти мети дослідження, а саме: провести порівняльний аналіз актуальних способів використання БПЛА та НРЗ, визначити найбільш популярні напрями досліджень та алгоритми оптимізації, а також обґрунтувати доцільність застосування хмарних технологій для оптимізації їх роботи.

Результати дослідження показали, що найбільш актуальними темами в галузі БПЛА та НРЗ є застосування хмарних технологій, інтеграція НРЗ у системи з БПЛА, розробка систем попередження пожеж та застосування методів машинного навчання. Серед алгоритмів оптимізації найбільшу популярність мають A^* , оптимізація методом рою часток та генетичні алгоритми. Ці методи активно використовуються для вирішення складних задач планування маршрутів та розподілу завдань у групах БПЛА та НРЗ.

Важливим висновком є те, що використання хмарних технологій відкриває нові можливості для підвищення ефективності роботи БПЛА та НРЗ. Хмарні платформи дозволяють перенести ресурсоємні обчислення на віддалені сервери, що значно розширює можливості оптимізації маршрутів та розподілу завдань. Це особливо актуально в контексті обмежених обчислювальних ресурсів самих пристроїв. Крім того, інтеграція з хмарними сервісами погоди дозволяє враховувати метеорологічні умови при плануванні місій, що підвищує їх надійність та ефективність.

Однак, дослідження виявило і певні прогалини в існуючих роботах. Зокрема, недостатньо уваги приділяється впливу різноманітних погодних умов на роботу БПЛА та НРЗ, а також детальному розрахунку надійності місій. Ці аспекти є критично важливими для практичного застосування безпілотних систем, особливо в складних умовах та при виконанні відповідальних завдань.

Тому подальші дослідження мають зосередитися на розробці адаптивних алгоритмів, здатних враховувати динамічні зміни навколишнього середовища, та на створенні комплексних моделей оцінки надійності місій з урахуванням як технічних характеристик пристроїв, так і зовнішніх факторів. Запропоновано схема системи для оптимізації завдань мультиагентних систем з використанням хмарних технологій, балансувача навантаження та стороннього сервісу погоди.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sun, Y., Fesenko, H., Kharchenko, V., Zhong, L., Kliushnikov, I., Illiashenko, O., Sachenko, A. UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application. *Sensors*, vol. 22, iss.17, iss. 17, article no. 6444, pp.1–31, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22176444>.

2. . Kliushnikov, I. M., Fesenko, H. V., Kharchenko, V. S. Scheduling UAV Fleets for the Persistent Operation of UAV-Enabled Wireless Networks During NPP Monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*, vol. 1, iss.93, pp. 29–36, 2020. <https://doi.org/10.32620/reks.2020.1.03>.
3. A. Puente-Castro, D. Rivero, A. Pazos, E. Fernandez-Blanco. A Review of Artificial Intelligence Applied to Path Planning in UAV Swarms. *Neural Computing and Applications*, vol. 34, no. 1, 2022, pp. 153–70. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06569-4>.
4. M. Hooshyar, Y.-M. Huang, Meta-Heuristic Algorithms in UAV Path Planning Optimization: A Systematic Review (2018–2022). *Drones*, vol. 7, no. 12, 2023, p. 687. <https://doi.org/10.3390/drones7120687>.
5. I. Kliushnikov, V. Kharchenko, I. Cherepnov, O. Morozova, S. Rudakov, O. Kompaniets. Structural-Parametric Synthesis of Multi-Agent UAV-based SMR Monitoring system: an Ontology Approach, *13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 2023, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416509>.
6. H. Chung, S. Oh, D. H. Shim, S. S. Sastry. Toward Robotic Sensor Webs: Algorithms, Systems, and Experiments. *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 9, 2011, pp. 1562–86. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2158598>.
7. E. Al. M. Mohammed Thaha. An Aerial Robotics Investigation into the Stability, Coordination, and Movement of Strategies for Directing Swarm and Formation of Autonomous MAVs and Diverse Groups of Driverless Vehicles (UGVs). *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 11, no. 3, 2023, pp. 301–04. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i3.8908>.
8. F. Aljalaud, H. Kurdi, K. Youcef-Toumi. Bio-Inspired Multi-UAV Path Planning Heuristics: A Review. *Mathematics*, vol. 11, no. 10, 2023, p. 2356. <https://doi.org/10.3390/math11102356>.
9. F. Miao et al. Optimizing UAV Path Planning in Maritime Emergency Transportation: A Novel Multi-Strategy White Shark Optimizer. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 7, July 2024, p. 1207. <https://doi.org/10.3390/jmse12071207>.
10. Y. Gong, K. Chen, T. Niu, Y. Liu, Gong, Yiguang, et al. Grid-Based Coverage Path Planning with NFZ Avoidance for UAV Using Parallel Self-Adaptive Ant Colony Optimization Algorithm in Cloud IoT. *Journal of Cloud Computing*, vol. 11, no. 1, 2022, p. 29. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00298-2>.
11. H. Tang, Q. Zhu, B. Qin, R. Song, Z. Li. UAV Path Planning Based on Third-Party Risk Modeling. *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 2023, p. 22259. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49396-4>.
12. J. Gao, Y. Zheng, K. Ni, Q. Mei, B. Hao, and L. Zheng. Fast Path Planning for Firefighting UAV Based on A-Star Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2029, no. 1, 2021, p. 012103. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2029/1/012103>.
13. L. Li, Z. Wang, J. Zhu, S. Ma. Smartphone-Based Task Scheduling in UAV Networks for Disaster Relief. *Electronics*, vol. 13, no. 15, 2024, p. 2903. <https://doi.org/10.3390/electronics13152903>.
14. M. El Debeiki, S. Al-Rubaye, A. Perrusquía, C. Conrad, J. A. Flores-Campos. An Advanced Path Planning and UAV Relay System: Enhancing Connectivity in Rural Environments. *Future Internet*, vol. 16, no. 3, 2024, p. 89. <https://doi.org/10.3390/fi16030089>.
15. C. Gao, X. Wang, X. Chen, B. M. Chen. A Hierarchical Multi-UAV Cooperative Framework for Infrastructure Inspection and Reconstruction. *Control Theory and Technology*, vol. 22, no. 3, 2024, pp. 394–405. <https://doi.org/10.1007/s11768-024-00202-0>.
16. W. Harris, S. Tseng, T. Viso, M. Weissman, C.-K. Ngan. Swarm Intelligence Path-Planning Pipeline and Algorithms for UAVs: Simulation, Analysis and Recommendation. *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems, SCITEPRESS - Science and Technology Publications*, 2024, pp. 747–58. <https://doi.org/10.5220/0012686000003690>.
17. Y. Shi, Y. Liu, B. Ju, Z. Wang, X. Du. Multi-UAV Cooperative Reconnaissance Mission Planning Novel Method under Multi-Radar Detection. *Science Progress*, vol. 105, no. 2, 2022, p. 003685042211037. <https://doi.org/10.1177/00368504221103785>.
18. Y. Yu, S. Lee. Efficient Multi-UAV Path Planning for Collaborative Area Search Operations. *Applied Sciences*, vol. 13, no. 15, 2023, p. 8728. <https://doi.org/10.3390/app13158728>.
19. X. Liu, Y. Su, Y. Wu, Y. Guo. Multi-Conflict-Based Optimal Algorithm for Multi-UAV Cooperative Path Planning. *Drones*, vol. 7, no. 3, 2023, p. 217. <https://doi.org/10.3390/drones7030217>.
20. R. Yuhang, Z. Liang. An Adaptive Evolutionary Multi-Objective Estimation of Distribution Algorithm and Its Application to Multi-UAV Path Planning. *IEEE Access*, vol. 11, 2023, pp. 50038–51. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3270297>.
21. B. Qiu, X. Li, and X. Li. Joint Offloading Decision and Trajectory Optimization for Multi-UAV-Assisted Mobile Edge Computing System. *Wireless Network*, 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3802943/v1>.
22. Y. Yu, S. Lee. Multi-UAV Coverage Path Assignment Algorithm Considering Flight Time and Energy Consumption. *IEEE Access*, vol. 12, 2024, pp. 26150–62. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3366998>.
23. J. Fu, G. Sun, J. Liu, W. Yao, L. Wu. On Hierarchical Multi-UAV Dubins Traveling Salesman Problem Paths in a Complex Obstacle Environment. *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 54, no. 1, 2024, pp. 123–35. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2023.3265926>.
24. G. Tang, T. Xiao, P. Du, P. Zhang, K. Liu, L. Tan. Improved PSO-Based Two-Phase Logistics UAV Path Planning under Dynamic Demand and Wind Conditions. *Drones*, vol. 8, no. 8, 2024, p. 356. <https://doi.org/10.3390/drones8080356>.
25. M. S. Mondal et al. Cooperative Multi-Agent Planning Framework for Fuel Constrained UAV-UGV Routing Problem. *Preprint arXiv*, 2023. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2309.03397>.
26. Z. Li, W. Zhao, C. Liu. Completion Time Minimization for UAV-UGV-Enabled Data Collection. *Sensors*, vol. 22, no. 15, 2022, p. 5839. <https://doi.org/10.3390/s22155839>.
27. J. Ni, M. Tang, Y. Chen, W. Cao. An Improved Cooperative Control Method for Hybrid Unmanned Aerial-Ground System in Multitasks. *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2020, 2020, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1155/2020/9429108>.
28. T. Ma, P. Lu, F. Deng, K. Geng. Air-Ground Collaborative Multi-Target Detection Task Assignment and Path Planning Optimization. *Drones*, vol. 8, no. 3, 2024, p. 110. <https://doi.org/10.3390/drones8030110>.
29. Q. Wu, Z. Geng, Y. Ren, Q. Feng, J. Zhong. Multi-UAV Redeployment Optimization Based on Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Oriented to Swarm Performance Restoration. *Sensors*, vol. 23, no. 23, Nov. 2023, p. 9484. <https://doi.org/10.3390/s23239484>.

30. X. Zhao, R. Yang, L. Zhong, Z. Hou. Multi-UAV Path Planning and Following Based on Multi-Agent Reinforcement Learning. *Drones*, vol. 8, no. 1, 2024, p. 18. <https://doi.org/10.3390/drones8010018>
31. M. Yang, G. Liu, Z. Zhou, and J. Wang. Partially Observable Mean Field Multi-Agent Reinforcement Learning Based on Graph Attention Network for UAV Swarms. *Drones*, vol. 7, no. 7, 2023, p. 476. <https://doi.org/10.3390/drones7070476>
32. S. Vyas, S. S. Verma, A. Prasad. Study of UAV Management Using Cloud-Based Systems. *Deep Learning Technologies for the Sustainable Development Goals*, edited by Virender Kadyan et al., Springer Nature Singapore, 2023, pp. 97–110. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5723-9_7
33. M. Aldossary. Optimizing Task Offloading for Collaborative Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Fog–Cloud Computing Environments. *IEEE Access*, vol. 12, 2024, pp. 74698–710. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3405566>
34. L. Matlekovic, F. Juric, P. Schneider-Kamp. Microservices for Autonomous UAV Inspection with UAV Simulation as a Service. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 119, 2022, p. 102548. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102548>
35. A. S. Seisa, S. G. Satpute, B. Lindqvist, G. Nikolakopoulos. An Edge-Based Architecture for Offloading Model Predictive Control for UAVs. *Robotics*, vol. 11, no. 4, 2022, p. 80. <https://doi.org/10.3390/robotics11040080>
36. F. A. Silva et al. Aerial Computing: Enhancing Mobile Cloud Computing with Unmanned Aerial Vehicles as Data Bridges—A Markov Chain Based Dependability Quantification. *ICT Express*, vol. 10, no. 2, 2024, pp. 406–11. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2023.10.002>
37. M. B. Bezziane et al. Game Theory-Based UAV-Cloud for Service Selection Architecture in Flying Ad Hoc Networks. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2024, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2024.3430818>
38. S. Poghosyan et al. Cloud-Based Mathematical Models for Self-Organizing Swarms of UAVs: Design and Analysis. *Drone Systems and Applications*, vol. 12, 2024, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0039>
39. Y. Zhou, H. Ge, B. Ma, S. Zhang, J. Huang. Collaborative Task Offloading and Resource Allocation with Hybrid Energy Supply for UAV-Assisted Multi-Clouds. *Journal of Cloud Computing*, vol. 11, no. 1, 2022, p. 42. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00317-2>
40. M. Itkin, M. Kim, Y. Park. Development of Cloud-Based UAV Monitoring and Management System. *Sensors*, vol. 16, no. 11, 2016, p. 1913. <https://doi.org/10.3390/s16111913>
41. H. A. Alharbi, M. Aldossary, J. Almutairi, I. A. Elgendy. Energy-Aware and Secure Task Offloading for Multi-Tier Edge-Cloud Computing Systems. *Sensors*, vol. 23, no. 6, 2023, p. 3254. <https://doi.org/10.3390/s23063254>
42. J. Wang, P. Jiang, J. Qi. A Planning Method for Operational Test of UAV Swarm Based on Mission Reliability. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 140, no. 2, 2024, pp. 1889–918. <https://doi.org/10.32604/cmescs.2024.049813>
43. I. Ruban, V. Lebediev. Method for Determining the Rational Number of UAV Flotilla Taking Into Account the Reliability of the Aircraft. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, no. 1 (23), 2023, pp. 108–14. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.108>
44. Y. Wang, F. Gao, M. Li. Probabilistic Path Planning for UAVs in Forest Fire Monitoring: Enhancing Patrol Efficiency through Risk Assessment. *Fire*, vol. 7, no. 7, 2024, p. 254. <https://doi.org/10.3390/fire7070254>
45. Y. Xu, J. Li, F. Zhang. A UAV-Based Forest Fire Patrol Path Planning Strategy. *Forests*, vol. 13, no. 11, 2022, p. 1952. <https://doi.org/10.3390/f13111952>
46. J. John and S. Sundaram. Genetic Algorithm-Based Routing and Scheduling for Wildfire Suppression Using a Team of UAVs. *Preprint arXiv*, 2024. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2407.19162>
47. X. Yan, R. Chen. Application Strategy of Unmanned Aerial Vehicle Swarms in Forest Fire Detection Based on the Fusion of Particle Swarm Optimization and Artificial Bee Colony Algorithm. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, 2024, p. 4937. <https://doi.org/10.3390/app14114937>
48. K. Takahashi, K. Aida, T. Tanjo, J. Sun. A Portable Load Balancer for Kubernetes Cluster. *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region, ACM*, 2018, pp. 222–231. <https://doi.org/10.1145/3149457.3149473>

Received (Надійшла) 26.07.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.10.2024

Group application of unmanned aerial vehicles and unmanned ground vehicles: applications, tasks, features and technologies used

Artem Serediuk, Ihor Kliushnikov

Abstract. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and unmanned ground vehicles (UGVs) is a current trend. At the same time, their individual use is moving to group use when it is necessary to ensure communication and optimal use of resources. The subject of the article is the processes of group use of unmanned aerial and ground vehicles. The purpose of the article is to carry out a comprehensive analysis of the main areas of application of UAVs and UGVs, to determine the methods of task optimization for groups of these devices, and to assess the feasibility and prospects of introducing cloud technologies for task distribution and route optimisation. As a result of the work, it is determined that the most relevant topics in the field of UAVs and UGVs are the use of cloud technologies, the integration of UAVs and UGVs, and the integration of UAVs and UGVs with other technologies. These methods and technologies are actively used in solving complex problems of route planning and task distribution in UAV and UAS groups. However, insufficient attention is paid to the impact of various weather conditions on UAV and UGV operations, as well as to the calculation of mission reliability. These aspects are critically important for the practical application of unmanned systems, especially in difficult conditions and when performing critical tasks. development of adaptive algorithms capable of taking into account dynamic environmental changes and the creation of comprehensive models for assessing mission reliability, taking into account both the technical characteristics of devices and external factors. The direction of further research is the development of adaptive algorithms capable of taking into account dynamic changes in the environment and the creation of complex models for assessing mission reliability, taking into account both the technical characteristics of devices and external factors.

Keywords: unmanned aerial vehicle; unmanned ground vehicles; group application; research review; modern technologies.