

О. І. Крюченков, О. І. Морозова, Т. С. Нікітіна

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

МОБІЛЬНІ ЛОГІСТИЧНІ ТА МОНІТОРИНГОВІ СИСТЕМИ НА БАЗІ РОЇВ БПЛА: ВИКЛИКИ ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ

Анотація. Із розвитком технологій і активною цифровізацією аспектів життя від транспорту до торгівлі, зростає потреба у створенні надійних мобільних логістичних систем на базі роїв безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Застосування роїв БПЛА здатне суттєво підвищити ефективність логістичних і моніторингових операцій, забезпечуючи безпеку та оптимізуючи витрати завдяки збору та аналізу даних для прийняття рішень у реальному часі. Основною метою цієї статті є огляд методів і програмних засобів, що забезпечують надійну роботу мобільних логістичних і моніторингових систем на базі роїв БПЛА. Також розглядаються ключові сфери діяльності з прикладами їх застосування, характерними рисами, проблемами, обмеженнями та перевагами. Стаття також формулює загальні виклики та обмеження у цій галузі. У роботі пропонується концепція використання роїв БПЛА для вирішення логістичних та моніторингових завдань, що підвищують ефективність роботи та знижують ризик виникнення непередбачених ситуацій протягом життєвого циклу операцій. Виділяються три основні підходи до реалізації таких систем: автономні рої БПЛА, рої, керовані оператором, і гібридні системи. Крім того, розглядається застосування роїв БПЛА у різних сферах діяльності, таких як доставка товарів, моніторинг складів та інфраструктури, а також підтримка пошуково-рятувальних операцій. Концепція мобільних логістичних і моніторингових систем на базі роїв БПЛА може бути впроваджена майже у всіх галузях, але ця стаття зосереджена на найпоширеніших сферах, що суттєво вплинули на розвиток таких систем. Проведено аналіз основних галузей застосування роїв БПЛА, визначено особливості та проблеми їх використання у кожній із розглянутих сфер діяльності. Було узагальнено виклики, переваги та специфіку використання роїв БПЛА.

Ключові слова: рої БПЛА, мобільні логістичні системи, безпілотні літальні апарати, ефективність логістики, автономні системи управління, цифровізація логістики, обробка великих даних, безпека даних, стандартизація, відмовостійкість, оптимізація маршрутів.

Вступ

Сучасні логістичні системи стикаються з необхідністю адаптувати новітні технології для підвищення ефективності та надійності. Однією з ключових технологій, що сприяють цій революції, є рої безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які можуть виконувати складні задачі без втручання людини, знижуючи витрати та підвищуючи безпеку операцій.

Методи та програмні засоби для створення й використання гарантоздатних мобільних логістичних систем на базі роїв БПЛА спрямовані на підвищення ефективності логістичних процесів, зменшення витрат та підвищення надійності систем.

Рої БПЛА дозволяють створювати точні моделі фізичних об'єктів або процесів, які здатні збирати інформацію з реального середовища, виконувати перевірку та задачі в труднодоступних для людей місцях. Це допомагає приймати рішення в реальному часі для підвищення ефективності роботи.

Існують три основні підходи до моделювання: фундаментальне моделювання, моделювання на основі даних і гібридне моделювання. Інший аспект використання роїв БПЛА – це ієрархія їх застосування: від моделювання компонентів і обладнання до систем та процесів. Рої БПЛА можуть представляти прості сенсори або можуть об'єднувати та координувати роботу кількох виробничих підсистем..

Застосування роїв БПЛА в логістиці може відбуватися майже у всіх сферах діяльності, але основними галузями є транспорт, торгівля та промисловість.

У дослідженні, проведеному в 2019 році Joopur Eun та колегами, був виконаний математичний аналіз стійкості логістичних систем, що базуються на використанні БПЛА. Це дослідження дозволило виділити

ключові параметри, які є критичними для забезпечення надійності таких систем [1]. Ідея використання роїв БПЛА у логістиці швидко набула популярності завдяки своїй здатності оптимізувати процеси доставки і значно зменшувати час на виконання завдань.

Концепція використання роїв БПЛА передбачає ієрархічну структуру, що включає компоненти, майно, системи та процеси. Рої БПЛА можуть бути використані як для виконання функцій простих сенсорів, так і для моделювання декількох виробничих підсистем одночасно. Це відкриває нові можливості для автоматизації та оптимізації логістичних операцій, забезпечуючи високу ефективність і гнучкість у управлінні ресурсами [2].

Метою цієї статті є аналіз концепції роїв БПЛА в контексті мобільних логістичних і моніторингових систем, визначення ключових напрямів їхнього застосування, а також вивчення методів забезпечення надійності цих систем. У статті розглядаються конкретні задачі, які включають: оцінку ефективності використання роїв БПЛА для вирішення логістичних та моніторингових завдань, аналіз особливостей, проблем і переваг при використанні роїв БПЛА у різних сферах, загальні проблеми та обмеження, з якими стикаються мобільні системи на базі роїв БПЛА. Аналіз цих джерел проведено відповідно до класифікації, описаної в розділі 2, з підсумковим оглядом підходів, представлених у розділі 3. Далі наведено висновки і подальші напрямки роботи.

1. Огляд видів роїв БПЛА

Рої безпілотних літальних апаратів являють собою один із найбільш передових напрямків у сучасній логістиці та автоматизації. Вони мають потенціал значно змінити способи доставки, управління ресурсами

та виконання багатьох інших завдань. Цей огляд фокусується на різних типах роїв БПЛА, їх функціональних можливостях та застосуваннях. Рої БПЛА можуть класифікуватися за різними ознаками, такими як типи апаратів, що входять до складу рою, рівень автономності, способи управління, а також за специфічними завданнями, які вони виконують (рис. 1).



Рис. 1. Класифікація роїв БПЛА

За типами апаратів:

- **Однорідні рої:** Всі апарати у рої є ідентичними за своїми характеристиками і функціями. Це дозволяє стандартизувати процеси управління та координації, але обмежує гнучкість у виконанні різноманітних завдань.

- **Різнорідні рої:** Включають апарати різних типів та характеристик. Це дає змогу виконувати ширший спектр завдань, проте ускладнює управління і координацію.

За рівнем автономності:

- **Повністю автономні рої:** Мають здатність самостійно приймати рішення на основі заданих алгоритмів і сенсорної інформації. Використовуються для складних і небезпечних завдань, де людське втручання є мінімальним або неможливим.

- **Напівавтономні рої:** Виконують завдання під наглядом і з можливістю втручання оператора. Це поєднує переваги автоматизації та гнучкість ручного управління.

За способами керування:

- **Централізовані рої:** Управління здійснюється з одного центрального вузла, який координує всі дії апаратів у рої. Це спрощує контроль, але створює ризик виходу з ладу всього рою у випадку проблем із центральним вузлом.

- **Децентралізовані рої:** Кожен апарат має певну ступінь автономності і здатний взаємодіяти з іншими апаратами для координації дій. Це підвищує стійкість до відмов окремих компонентів і забезпечує більшу гнучкість.

Класифікація мобільних логістичних систем із застосуванням технології роїв БПЛА наведена на рис. 2. Рої БПЛА можуть виконувати різноманітні завдання, що залежать від їхньої конфігурації та програмного забезпечення. Серед основних функціональних можливостей виділяють:

- **Моніторинг і спостереження:** Рої БПЛА можуть використовуватися для збирання даних у реальному часі, що є особливо корисним у сільському господарстві, лісовому господарстві, охороні навколишнього середовища та міському плануванні [24].

- **Логістика і доставка:** Здатні швидко і ефективно доставляти вантажі, медикаменти та інші критично важливі ресурси у віддалені або важкодоступні райони [41].

- **Пошуково-рятувальні операції:** Рої можуть швидко обстежувати великі площі, виявляти постраждалих і передавати інформацію рятувальним службам [9].

- **Інфраструктурні інспекції:** Використовуються для перевірки стану мостів, ліній електропередач, нафто- і газопроводів, що дозволяє виявляти проблеми на ранніх стадіях і проводити необхідні ремонтні роботи.

Також рої БПЛА можуть бути застосовані в різних галузях:

- **Сільське господарство:** Використовуються для моніторингу стану посівів, внесення добрив та пестицидів, а також для оцінки врожайності [28].

- **Будівництво та інфраструктура:** Забезпечують інспекції будівельних майданчиків, моніторинг прогресу будівництва та перевірку безпеки споруд.

- **Військова справа:** Використовуються для розвідки, спостереження, а також для тактичних операцій, що потребують координації великої кількості апаратів.

- **Екологічний моніторинг:** Допомогають у виявленні і моніторингу екологічних проблем, таких як забруднення води і повітря, зсуви ґрунту та інші природні явища.

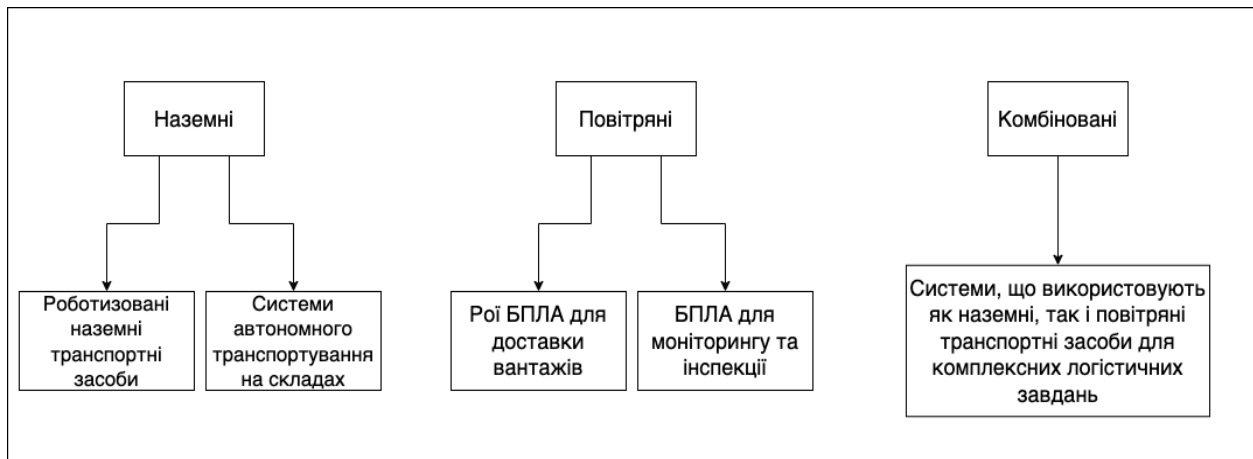


Рис. 2. Класифікація мобільних логістичних систем із застосуванням технології роїв БПЛА

2. Класифікація джерел

Концепція роїв БПЛА може бути застосована в багатьох сферах діяльності, але в цій статті розглядаються найбільш поширені галузі, які можна вважати основними або такими, що суттєво вплинули на розвиток цієї технології. Таким чином, було переглянуто низку оглядових робіт щодо роїв БПЛА, щоб зрозуміти найбільш обговорювані галузі з точки зору (табл. 1).

Логістика, розумні міста та галузі охорони здоров'я можна знайти майже в кожній оглядовій статті чи роботі про рої БПЛА. Табл. 1 це підтверджує. Ці галузі були обрані основними для огляду в поточній статті. Ще три галузі будуть розглянуті через цікаві роботи та для поширення контексту при аналізі індустрії роїв БПЛА, а саме освіта, будівництво та залізничний транспорт. Було розглянуто додаткові роботи із конкретними прикладами впровадження роїв БПЛА у кожній із індустрій.

Повний перелік галузей, які будуть розглянуті, і пов'язані роботи можна знайти в табл. 2.

Таблиця 1 – Галузі та оглядові роботи, в яких ці галузі аналізувалися

№	Галузь	Оглядові роботи
1	Логістика	[1], [2], [3], [4], [5], [6], [37], [38], [39], [40], [41], [42]
2	Безпека	[9], [10], [11], [14], [30]
3	Моніторинг	[9], [24], [32], [34], [44], [45], [46]
4	Комунікації	[7], [8], [9], [10], [27]
5	Розумні міста	[12], [13], [14], [15], [16], [29]
6	Системи забезпечення надійності	[17], [18], [19], [23], [35]
7	Машинне навчання	[20], [21], [22], [25], [26], [28], [31], [33], [36]

Таблиця 2 – Перелік індустрій для огляду та аналізу

#	Галузь	Роботи за напрямками
1	Логістика	1. Оглядові статті, що включають галузь [1-4, 37-42] 2. Implementation and Critical Factors of UAV in Warehouse Management: A Syst. Literature Review - [5] 3. A Real-Time Path Planning Method for Urban Low-Altitude Logistics UAVs - [6]
2	Безпека	1. Оглядові статті, що включають галузь [9-11, 14, 30] 2. A New Shift in Implementing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Safety and Security of Smart Cities: A Systematic Literature Review. - [12]
3	Моніторинг	1. Оглядові статті, що включають галузь [9, 24, 32, 34, 44, 45, 46] 2. Routing Protocols for UAV-Aided Wireless Sensor Networks - [7]
4	Комунікації	1. Оглядові статті, що включають галузь [8-10, 27] 2. Routing Protocols for UAV-Aided Wireless Sensor Networks - [7] 3. A New Shift in Implementing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Safety and Security of Smart Cities: A Systematic Literature Review - [12]
5	Розумні міста	1. Оглядові статті, що включають галузь [12-16, 29] 2. Meta-analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Agro-environmental Monitoring Using Machine Learning and Statistical Models - [28] 3. 3D Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies - [34]
6	Системи забезпечення надійності	1. Оглядові статті, що включають галузь [17-19, 23, 35] 2. Towards Fully Autonomous UAVs: A Survey - [20]; 3. Artificial Intelligence-Based Autonomous UAV Networks: A Survey - [21] 4. Autonomous Control of Unmanned Aerial Vehicles - [22]
7	Аналіз та обробка даних	1. Оглядові статті, що включають галузь [20-22, 25, 26, 28, 31, 33, 36] 2. Impact of Texture Information on Crop Classification with Machine Learning and UAV Images - [31] 3. A UAV-Swarm-Communication Model Using a Machine-Learning Approach for Search-and-Rescue Applications - [32]

3. Аналіз джерел та підходів за різними індустріями у використанні роїв БПЛА

Для визначення переваг і проблем у застосуванні роїв БПЛА, а також формулювання загальних викликів і особливостей, було прийнято рішення про аналізувати ключові індустрії, де використовуються рої БПЛА. Це дозволить більш широко поглянути на можливості технології. У цьому розділі будуть детально розглянуті та проаналізовані обрані галузі застосування роїв БПЛА. Кожен із параграфів по галузі містить загальний опис, особливості, проблеми та приклади використання.

3.1. Логістика. Сьогодні логістика є однією з найперспективніших сфер для впровадження та

інтеграції роїв БПЛА. Цей сектор включає різні формати використання роїв на кожному етапі ланцюга постачань – від складування та транспортування до доставки та обслуговування. Рої БПЛА можуть допомогти з оптимізацією маршрутів доставки, моніторингом стану вантажів, оцінюванням ефективності логістичних процесів, а також покращенням обслуговування клієнтів через швидку і точну доставку. Очікується, що рої БПЛА стануть головним інструментом у логістичній системі майбутнього, оскільки їх можна застосовувати на кожному етапі логістичного циклу.

Одним із викликів у логістичних системах є автоматизація та забезпечення надійної доставки в економічно ефективний спосіб. Рої БПЛА можуть допо-

могли в оцінці та аналізі ефективності логістичних операцій, а також кожного з факторів, що впливають на якість та швидкість доставки.

В одній із робіт [5] було запропоновано модель із трьома типами застосувань роїв БПЛА у логістичних процесах, які фокусуються на різних аспектах логістики:

- Рої для моніторингу вантажів – стеження за станом та безпекою вантажів під час транспортування.
- Рої для оптимізації маршрутів – планування найкращих маршрутів для швидкої та ефективної доставки.
- Рої для автоматизації складування – автоматичне переміщення товарів на складі.

Також було запропоновано додати четвертий пункт до розглянутої класифікації – утилізація та переробка відходів логістичних операцій.

Інше дослідження [43] показує, що рої БПЛА можуть бути корисними під час навчання логістичного персоналу або для допомоги низько кваліфікованим працівникам. Операторам потрібні глибокі знання системи, щоб швидко приймати важливі рішення під час логістичних операцій. У одній зі статей пропонується використовувати мобільну систему віддаленого моніторингу з використанням доповненої реальності, щоб допомогти операторам із низькою кваліфікацією полегшити робочий процес.

Логістика також має власний перелік проблем:

- Робота роїв БПЛА у режимі реального часу – логістика вимагає швидкої реакції. Водночас, рої потребують потужності для обробки великих обсягів даних.
- Величезні обсяги даних – велика кількість взаємозв'язків ускладнює систему та генерує великий потік даних.
- Рої БПЛА у логістиці відкривають двері для майбутніх систем автоматизованої доставки, забезпечуючи швидкість, точність та ефективність усіх логістичних процесів.

3.2. Безпека. Рої БПЛА стають все більш важливими у сфері безпеки завдяки своїй здатності швидко та ефективно виконувати різні завдання. Основні аспекти використання роїв БПЛА в цій галузі:

Рої БПЛА можуть бути ефективно використані для моніторингу великих територій у реальному часі. Вони можуть забезпечити безперервне спостереження за критичними інфраструктурними об'єктами, такими як електростанції, трубопроводи або нафтобази. Завдяки своїй мобільності та можливості працювати в координації, рої БПЛА можуть швидко реагувати на будь-які загрози або підозрілі дії, забезпечуючи операторів необхідною інформацією для прийняття рішень.

Рої БПЛА можуть значно покращити ефективність пошуково-рятувальних операцій [9]. Вони можуть швидко покривати великі площі, виявляти постраждалих і передавати їхні координати рятувальним командам. Оснащені камерами з високою роздільною здатністю та інфрачервоними сенсорами, дрони можуть працювати як вдень, так і вночі, у важкодоступних або небезпечних для людей місцях.

Рої БПЛА також можуть бути використані для контролю масових заходів, забезпечуючи безпеку під час концертів, спортивних подій або протестів. Вони можуть відстежувати натовп, виявляти потенційні загрози та швидко передавати інформацію правоохоронним органам. Завдяки своїй мобільності, рої можуть оперативно реагувати на зміни ситуації та надавати підтримку в реальному часі.

У сфері антитерористичних операцій рої БПЛА можуть виконувати розвідувальні місії, забезпечувати ситуаційну обізнаність та навіть брати участь у нейтралізації загроз. Вони можуть проникати у важкодоступні місця, забезпечуючи операторів інформацією, що дозволяє краще планувати операції та мінімізувати ризики для особового складу.

Однак існують і виклики, пов'язані з їх використанням, такі як забезпечення надійного зв'язку між дронами, захист від кібератак та інтеграція з існуючими системами безпеки.

Рої БПЛА мають величезний потенціал у сфері безпеки завдяки своїм унікальним можливостям. Незважаючи на існуючі виклики, розвиток технологій та інтеграція роїв БПЛА з існуючими системами безпеки можуть значно покращити загальний рівень безпеки.

3.3. Моніторинг. Рої БПЛА також є важливим інструментом для різноманітних завдань з моніторингу завдяки своїй гнучкості, автономності та здатності працювати у координації. Нижче наведені основні способи використання роїв БПЛА у цій сфері:

Рої БПЛА можуть бути оснащені датчиками для моніторингу хімічних, біологічних, радіологічних та ядерних речовин. Це особливо важливо у ситуаціях, пов'язаних з аваріями на промислових об'єктах. БПЛА можуть швидко обстежити великі площі, виявити наявність небезпечних речовин та передати дані в реальному часі до відповідних служб [9].

Рої БПЛА використовуються для пошуку зниклих осіб у важкодоступних місцевостях або після стихійних лих. Оснащені тепловізорами та камерами з високою роздільною здатністю, дрони можуть швидко виявляти постраждалих [32], навіть у складних умовах, таких як лісові пожежі або землетруси. Ці дані дозволяють рятувальним службам оперативно реагувати та надавати допомогу.

БПЛА можуть бути обладнані сенсорами для моніторингу якості повітря та води, моніторингу витоків нафти та інших забруднюючих речовин. Вони здатні обстежувати великі водні та земельні території, виявляти джерела забруднення та контролювати екологічну ситуацію. Це особливо корисно для швидкого реагування на аварії та запобігання їх подальшому розповсюдженню. Рої БПЛА можуть бути використані для моніторингу та моніторингу лісових пожеж. Вони можуть оперативно оцінювати масштаби пожежі, виявляти нові осередки займання та надавати точну інформацію рятувальним командам. Це дозволяє швидше реагувати на пожежі та зменшувати шкоду для природи та населення.

Однак, існують і виклики, такі як забезпечення надійного зв'язку між дронами, інтеграція з існуючими системами та забезпечення кібербезпеки.

У реальних умовах рої БПЛА вже використовуються для моніторингу великих інфраструктурних проєктів, таких як нафтові платформи та газопроводи. Вони можуть виявляти витоки, оцінювати стан конструкцій та забезпечувати безпеку працівників.

Вони здатні забезпечити ефективний моніторинг, швидке реагування та високий рівень безпеки у різних галузях. Незважаючи на існуючі виклики, розвиток технологій та інтеграція роїв БПЛА з існуючими системами можуть значно покращити загальний рівень безпеки та ефективності моніторингу.

3.4. Комунікації. Рої БПЛА відкривають нові горизонти у сфері комунікацій завдяки своїй здатності забезпечувати швидке розгортання, гнучкість та автономність. Нижче наведені основні способи використання роїв БПЛА у цій галузі:

Рої БПЛА можуть бути розгорнуті для створення тимчасових комунікаційних мереж під час надзвичайних ситуацій, таких як стихійні лиха або техногенні катастрофи. Вони можуть забезпечувати зв'язок між рятувальними командами та постраждалими, допомагаючи координувати операції з рятування та надання допомоги [9].

У віддалених або важкодоступних районах рої БПЛА можуть бути використані для розгортання тимчасових мереж зв'язку [7]. Вони можуть забезпечувати інтернет-доступ, телефонний зв'язок та передачу даних для спільнот, які не мають постійної комунікаційної інфраструктури.

У містах рої БПЛА можуть бути використані для розширення існуючих комунікаційних мереж під час великих заходів, таких як спортивні події або концерти. Вони можуть забезпечувати додаткову пропускну здатність мережі, покращуючи якість зв'язку та швидкість передачі даних для учасників заходу.

У військовій сфері рої БПЛА можуть бути використані для забезпечення зв'язку між підрозділами в умовах бойових дій. Вони можуть створювати мобільні та захищені мережі, забезпечуючи надійний зв'язок навіть у найскладніших умовах. Це дозволяє командуванню ефективніше координувати дії військ та оперативно реагувати на змінні обставини.

У контексті розумних міст рої БПЛА можуть бути використані для забезпечення зв'язку між різними елементами міської інфраструктури. Вони можуть допомагати в управлінні дорожнім рухом, моніторингу стану навколишнього середовища, а також забезпечувати зв'язок між датчиками та системами управління [12].

Основними перевагами роїв БПЛА у сфері комунікацій є їхня мобільність, швидкість розгортання та гнучкість. Вони можуть забезпечувати зв'язок у найскладніших умовах, де традиційні методи комунікації недоступні або недостатньо ефективні. Однак, існують і виклики, такі як забезпечення безпеки передачі даних, стійкість до перешкод та тривалість роботи БПЛА.

Рої БПЛА мають великий потенціал у сфері комунікацій завдяки своїм унікальним можливостям. Вони здатні забезпечити надійний зв'язок у різних умовах, швидко реагувати на надзвичайні ситуації та

покращувати інфраструктуру зв'язку у міських та віддалених районах. Незважаючи на існуючі виклики, розвиток технологій та інтеграція роїв БПЛА з існуючими комунікаційними системами можуть значно підвищити загальний рівень комунікаційної інфраструктури.

3.5. Розумні міста. Розумні міста використовують сучасні технології для підвищення якості життя своїх мешканців, покращення інфраструктури та забезпечення стійкого розвитку. Рої БПЛА є важливим компонентом у цій екосистемі, оскільки вони можуть виконувати різноманітні завдання з високою ефективністю та гнучкістю.

Рої БПЛА можуть використовуватися для регулярного моніторингу стану міської інфраструктури, включаючи мости, дороги, будівлі та інші об'єкти. Вони можуть здійснювати інспекції, виявляти пошкодження та запобігати аваріям, забезпечуючи тим самим безпеку та довговічність міських споруд.

У розумних містах рої БПЛА можуть допомагати у моніторингу та управлінні дорожнім рухом. Вони можуть збирати дані про трафік у режимі реального часу, виявляти затори та аварії, а також надавати рекомендації щодо оптимальних маршрутів для водіїв. Це допомагає зменшити затори, підвищити безпеку на дорогах та покращити загальну мобільність у місті.

Рої БПЛА можуть використовуватися для моніторингу [16] якості повітря, води та стану навколишнього середовища. Вони можуть збирати дані про рівень забруднення, викиди парникових газів та інші екологічні показники. Це дозволяє вчасно реагувати на екологічні проблеми та здійснювати заходи для їх вирішення, забезпечуючи таким чином здорове середовище для мешканців міста.

Рої БПЛА можуть забезпечувати патрулювання та моніторинг міських районів для підвищення рівня безпеки [12]. Вони можуть виявляти підозрілу активність, запобігати злочинам та оперативно реагувати на надзвичайні ситуації. Це дозволяє підвищити рівень громадської безпеки та створити комфортні умови для життя.

Управління відходами є важливою складовою розумних міст. Рої БПЛА можуть використовуватися для моніторингу та оптимізації процесу збору та утилізації відходів. Вони можуть здійснювати інспекції сміттєвих контейнерів, планувати маршрути для сміттєвозів та забезпечувати ефективну роботу системи управління відходами.

Під час надзвичайних ситуацій рої БПЛА можуть бути розгорнуті для швидкого реагування та надання допомоги [13]. Вони можуть здійснювати пошук і рятування постраждалих, доставляти медичні засоби та координувати рятувальні операції. Це дозволяє значно зменшити час реагування та підвищити ефективність рятувальних заходів.

Рої БПЛА мають великий потенціал у розвитку розумних міст. Вони можуть виконувати різноманітні завдання, забезпечуючи моніторинг, управління та реагування у різних сферах міського життя. Завдяки своїм унікальним можливостям, рої БПЛА можуть значно підвищити якість життя мешканців,

покращити інфраструктуру та забезпечити стійкий розвиток міських територій..

3.6. Системи забезпечення надійності. Системи забезпечення надійності є ключовим аспектом при використанні роїв БПЛА у різних сферах. Рої БПЛА можуть значно підвищити системи забезпечення надійності у інфраструктурі, комунікаціях та операціях завдяки своїй гнучкості, швидкості реагування та можливості працювати у важкодоступних місцях.

Рої БПЛА можуть проводити регулярний моніторинг критичної інфраструктури, такої як мости, дамби, електростанції та нафтопроводи. Вони здатні швидко виявляти пошкодження або ознаки зносу, що дозволяє своєчасно проводити необхідні ремонтні роботи та запобігати аваріям. Завдяки цьому підвищується загальна надійність інфраструктурних об'єктів [17].

У сфері енергетики, наприклад, рої БПЛА можуть використовуватися для інспекції ліній електропередач та вітрових турбін. Вони можуть здійснювати детальну перевірку стану обладнання, виявляти дефекти та планувати обслуговування без необхідності зупинки роботи систем. Це забезпечує безперервність роботи та зменшує ризики відмов обладнання.

Під час природних катастроф або техногенних аварій рої БПЛА можуть швидко реагувати та надавати оперативну інформацію про стан інфраструктури та допомагати у проведенні рятувальних операцій. Вони можуть створювати карти зруйнованих територій, знаходити постраждалих та доставляти необхідні ресурси, що підвищує ефективність реагування та зменшує втрати.

Рої БПЛА можуть використовуватися для забезпечення надійності комунікацій у важкодоступних або віддалених районах. Вони можуть створювати тимчасові мережі зв'язку у разі виходу з ладу стаціонарної інфраструктури або забезпечувати зв'язок під час великих заходів, коли існуючі мережі перевантажені. Це дозволяє забезпечити безперервний зв'язок у критичних ситуаціях [19].

Рої БПЛА є потужним інструментом для забезпечення надійності у різних сферах. Вони можуть проводити детальний моніторинг, інспекції та обслуговування інфраструктури, реагувати на надзвичайні ситуації та забезпечувати надійність комунікацій. Завдяки своїм унікальним можливостям рої БПЛА сприяють підвищенню надійності та безпеки у сучасних системах та інфраструктурах.

3.7. Аналіз та обробка даних. Машинне навчання є однією з найбільш перспективних технологій, яка може значно покращити функціональність та ефективність роїв БПЛА. Використання ШІ в роях БПЛА відкриває нові можливості для автоматизації, обробки даних, прийняття рішень та виконання складних завдань. ШІ дозволяє роям БПЛА працювати автономно без постійного втручання людини. Завдяки алгоритмам машинного навчання та нейронним мережам, БПЛА можуть самостійно організувати свою роботу, координувати дії з іншими дронами в рої та адаптуватися до змінних умов середовища. Це особливо корисно для виконання завдань у важкодоступних або небезпечних місцях.

Рої БПЛА, оснащені ШІ, можуть збирати та обробляти величезні обсяги даних у режимі реального часу. Вони можуть аналізувати зображення та відео [28], виявляти аномалії, розпізнавати об'єкти та робити висновки на основі зібраної інформації. Це дозволяє використовувати рої БПЛА для моніторингу стану інфраструктури, сільськогосподарських угідь, природних ресурсів та інших об'єктів. ШІ може оптимізувати маршрути польоту роїв БПЛА для виконання різних завдань, таких як доставка вантажів, патрулювання або пошуково-рятувальні операції. Алгоритми оптимізації можуть враховувати різні фактори, включаючи погодні умови, обмеження повітряного простору, енергетичні ресурси дронів та пріоритетність завдань, забезпечуючи таким чином ефективне використання ресурсів. ШІ дозволяє прогнозувати можливі поломки та відмови в роботі роїв БПЛА на основі аналізу даних про їхню експлуатацію. Це дозволяє вживати превентивні заходи для обслуговування та ремонту дронів, що знижує ризик неочікуваних поломок та підвищує загальну надійність системи.

У сфері безпеки рої БПЛА можуть використовувати ШІ для виявлення та знешкодження потенційних загроз. Наприклад, вони можуть ідентифікувати підозрілі об'єкти, відслідковувати рух підозрюваних осіб або транспортних засобів та навіть здійснювати автоматичне втручання у разі загрози. Це робить їх цінним інструментом для забезпечення громадської безпеки та боротьби зі злочинністю. ШІ дозволяє роям БПЛА навчатися на основі попереднього досвіду та адаптувати свої дії до нових умов. Це забезпечує постійне покращення їхньої ефективності та можливість виконання все більш складних завдань. Завдяки методам глибокого навчання, рої БПЛА можуть постійно вдосконалювати свої навички та здатність реагувати на нові виклики. В одній з робіт [36] було розглянуто використання ШІ для роїв БПЛА в сільському господарстві. Завдяки машинному навчанню дрони можуть аналізувати стан посівів, виявляти шкідників та хвороби рослин, прогнозувати врожайність та оптимізувати використання добрив. Інший приклад – застосування ШІ для координації роїв БПЛА під час рятувальних операцій після природних катастроф, де дрони можуть самостійно розподіляти зони пошуку та забезпечувати ефективну комунікацію між собою та рятувальниками.

Інтеграція ШІ в рої БПЛА значно розширює їхні можливості та підвищує ефективність виконання завдань. Завдяки автономності, інтелектуальному плануванню, прогнозуванню та адаптації, рої БПЛА можуть успішно виконувати різноманітні завдання у різних сферах, забезпечуючи високу надійність та продуктивність.

4. Висновки за оглядом напрямків

Рої БПЛА є відносно новою та інноваційною концепцією, що швидко розвивається. Вони вже демонструють значний потенціал у ряді галузей, включаючи оборону, безпеку, сільське господарство та логістику. Аналіз впровадження роїв БПЛА в цих сферах показує, що їх використання приносить численні

переваги, зокрема в підвищенні ефективності, зниженні витрат і розширенні можливостей для виконання складних завдань.

Відповідно до проведеного огляду, можна відзначити, що ключовими областями, де рої БПЛА знаходять найширше застосування, є: оборонний сектор, де вони використовуються для виконання розвідувальних і бойових завдань; сільське господарство, де рої допомагають у моніторингу культур і управлінні

ресурсами; та логістика, де вони оптимізують доставку товарів та управління складськими запасами. Однак рої БПЛА також активно використовуються в таких сферах, як надзвичайні ситуації та рятувальні операції, де їх здатність швидко реагувати і збирати інформацію є критично важливою.

У табл. 3 підсумовано основні характеристики та проблеми для кожної розглянутої галузі.

Таблиця 3 – Особливості та проблеми розглянутих галузей використання роїв БПЛА у мобільних логістичних системах

№	Галузь	Особливості	Виклики
1	Логістика	Рої БПЛА здатні автоматизувати складські операції, моніторити вантажі та оптимізувати маршрути доставки. Вони забезпечують ефективну координацію дій, що дозволяє скоротити час на виконання логістичних завдань і зменшити витрати.	Основними проблемами є необхідність інтеграції з існуючими логістичними системами, забезпечення безпеки даних і зменшення ризику зіткнень між дронами та іншими об'єктами.
2	Безпека	Рої БПЛА використовуються для патрулювання територій, моніторингу громадських заходів і швидкого реагування на надзвичайні ситуації. Вони здатні забезпечувати цілодобове спостереження та збір даних у реальному часі.	Основними викликами є захист від кіберзагроз, підтримання постійної комунікації між дронами та операторами.
3	Моніторинг	Рої БПЛА можуть використовуватися для моніторингу аномалій, моніторингу змін у навколишньому середовищі та розпізнавання об'єктів. Вони можуть проводити розвідку у важкодоступних або небезпечних місцях.	Основні проблеми включають забезпечення точності моніторингу, обробку великої кількості даних і розробку алгоритмів для автоматичного розпізнавання об'єктів.
4	Комунікації	Рої БПЛА можуть створювати тимчасові мережі для забезпечення зв'язку в зонах надзвичайних ситуацій або в районах з обмеженим доступом до інфраструктури. Вони можуть забезпечувати передачу даних і голосового зв'язку між різними точками.	Основними викликами є забезпечення стабільної передачі даних, подолання перешкод і зниження затримок у зв'язку.
5	Розумні міста	Рої БПЛА можуть допомагати у моніторингу та управлінні інфраструктурою розумних міст, включаючи транспортні системи, енергопостачання та системи безпеки. Вони здатні збирати дані про стан доріг, якість повітря та інші параметри міського середовища.	Основні проблеми включають інтеграцію з існуючими міськими системами, забезпечення приватності даних і створення нормативної бази для використання дронів у міських умовах.
6	Системи забезпечення надійності	Рої БПЛА можуть використовуватися для регулярного моніторингу стану інфраструктури, включаючи мости, дороги, електромережі та нафто- і газопроводи. Вони здатні виявляти пошкодження та прогнозувати необхідність обслуговування.	Основними викликами є забезпечення безперервної роботи рою в різних умовах, збирання точних даних і розробка алгоритмів для прогнозування відмов.
7	Аналіз та обробка даних	Інтеграція ШІ з роями БПЛА дозволяє автоматизувати складні завдання, включаючи обробку даних, прийняття рішень і адаптацію до змінних умов. ШІ допомагає дронам самостійно організувати свою роботу та оптимізувати виконання завдань.	Основні проблеми включають розробку ефективних алгоритмів ШІ, забезпечення безпеки та надійності систем, а також інтеграцію ШІ з іншими технологіями та системами.

Багато проблем, з якими стикаються рої БПЛА, є спільними для різних галузей, наприклад, проблеми з інтеграцією в існуючі системи, управління даними та забезпечення безпеки польотів. Важливо зазначити,

що, хоча рої БПЛА можуть бути адаптовані до різних завдань і середовищ, їх ефективність і переваги можуть бути максимізовані тільки за умови врахування

специфічних вимог кожної галузі та подолання існуючих викликів. Іншим аспектом, який виділяється в кожній галузі техніки, є застосування роїв БПЛА на різних рівнях протягом життєвого циклу логістичних систем. Як під час оптимізації маршрутів, так і під час автоматизації складування, початкові моделі можуть бути протестовані, а припущення підтверджені у віртуальному середовищі перед початком повномасштабного впровадження. І в системах безпеки, і в системах комунікацій рої БПЛА вимагають постійного моніторингу та обслуговування, яке можна оптимізувати за допомогою методів прогнозного технічного обслуговування.

Переваги. До основних переваг можна віднести:

- швидке впровадження та адаптація до змінних умов;
- прогнозування проблем і планування операцій – прогнозне обслуговування;
- безпека та зменшення ризиків – допомога в передбаченні аварій або простоїв системи;
- підвищення продуктивності та зниження витрат;
- доступність – рої БПЛА можуть контролюватися та використовуватися віддалено або в автоматизованому режимі;
- зменшення витрат – допомагають уникнути надмірного використання ресурсів та покращити ефективність операцій;
- навчання – спрощують процес навчання персоналу та полегшують виконання складних завдань.

Виклики. Основні проблеми при створенні роїв БПЛА пов'язані з високою складністю, точністю моделювання та забезпеченням безпеки систем. Це пов'язано з тим, що роївими системи БПЛА об'єднують широкий спектр передових технологій і, в деяких випадках, включають використання різних типів дронів. Сучасні проблеми можна підсумувати таким чином:

- енергоефективність – рої БПЛА зазвичай живляться від батареї, і управління енергією стає критичним, особливо для великих роїв, які можуть мати тривалі місії. Пошук способів продовжити час роботи на одному заряді залишається актуальним завданням;
- перешкоди між дронами – у роях, що складаються з великої кількості дронів, існує проблема інтерференції сигналу, яка може вплинути на координату та зв'язок між ними. Це стає особливо проблематичним у складних умовах або з великою кількістю дронів;
- кібербезпека – оскільки дрони працюють через бездротові мережі, вони можуть стати об'єктами хакерських атак. Захист каналів зв'язку та даних від кіберзагроз є важливою проблемою;
- забезпечення безпеки та надійності – у роях БПЛА важливо забезпечити надійність їх роботи навіть в умовах втрати зв'язку з центральним контроле-

ром або іншими дронами. Необхідні методи для самостійного прийняття рішень та адаптації до несподіваних ситуацій;

- правове регулювання – у багатьох країнах досі немає чітких правил і законів, що регулюють використання роїв БПЛА, особливо в громадських місцях. Це обмежує можливості їх застосування і може гальмувати розвиток техніки;

- етичні питання – використання роїв БПЛА, особливо у військових операціях, ставить багато етичних питань, включаючи відповідальність за дії автономних систем та їхній вплив на цивільне населення. Сучасні дослідження роїв БПЛА намагаються вирішити ці проблеми, одночасно розширюючи область їх застосування. Незважаючи на ці проблеми, рої БПЛА вважаються однією з провідних технологій у логістиці, військових та інших секторах. Зростаючий науковий інтерес до роїв БПЛА свідчить про їхнє велике значення не тільки для наукових досліджень, а й для практичного використання в різних сферах, таких як логістика, міське управління, та інші галузі, де важлива висока ефективність та оперативність процесів.

5. Подальші напрямки роботи

У рамках подальших досліджень планується розвивати тему «Моделі, методи та засоби розроблення і розгортання мобільних логістичних систем на базі роїв БПЛА».

Як зазначалося раніше, логістика є однією з ключових областей для використання роїв БПЛА, яка потребує високих стандартів ефективності та безпеки. Відповідно, основні задачі досліджень включають:

- розроблення концепції та системної моделі мобільних логістичних систем — створення фундаментальної моделі, яка враховуватиме специфіку роїв БПЛА та їх інтеграцію в логістичні процеси;
 - розроблення та дослідження математичних моделей МЛС як систем масового обслуговування — розробка математичних моделей для оптимізації логістичних операцій за умов різноманітності роїв БПЛА та вимог до часу доставки;
 - розроблення та дослідження методів забезпечення гарантоздатності МЛС — визначення методів для підвищення надійності системи з урахуванням логістичних показників, таких як швидкість, точність та безпека доставки;
 - розроблення методів і систем підтримки прийняття рішень — створення алгоритмів для формування оптимальних роїв БПЛА відповідно до конкретних логістичних завдань та умов кіберфізичного середовища.
- Таким чином, ця робота спрямована на покращення цілісності та безпеки мобільних логістичних систем на базі роїв БПЛА, підвищення їх продуктивності та адаптивності до складних умов експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Joonyup Eun, Byung Duk Song, Songbook Lee and Dae-Eun Lim, Mathematical Investigation on the Sustainability of UAV Logistics. Sustainability 2019, 11(21), 5932; <https://doi.org/10.3390/su11215932>
2. Yi Li, Min Liu and Dandan Jiang, Application of Unmanned Aerial Vehicles in Logistics: A Literature Review. Sustainability 2022, 14(21), 14473; <https://doi.org/10.3390/su142114473>

3. Hanxue Li, Shuaiqi Zhu, Amr Tolba, Ziyi Liu and Wu Wen, A Reliable Delivery Logistics System Based on the Collaboration of UAVs and Vehicles. *Sustainability* 2023, 15(17), 12720; <https://doi.org/10.3390/su151712720>
4. Shan Li, Honghai Zhang, Zhuolun Li and Hao Liu, An Air Route Network Planning Model of Logistics UAV Terminal Distribution in Urban Low Altitude Airspace. *Sustainability* 2021, 13(23), 13079; <https://doi.org/10.3390/su132313079>
5. Chommaphat Malang, Phasit Charoenkwan, and Ratapol Wudhikarn, Implementation and Critical Factors of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in Warehouse Management: A Systematic Literature Review. *Drones* 2023, 7(2), 80; <https://doi.org/10.3390/drones7020080>
6. Minyi Deng, Qingqing Yang and Yi Peng, A Real-Time Path Planning Method for Urban Low-Altitude Logistics UAVs. *Sensors* 2023, 23(17), 7472; <https://doi.org/10.3390/s23177472>
7. Muhammad Yeasir Arafat, Md Arafat Habib and Sangman Moh, Routing Protocols for UAV-Aided Wireless Sensor Networks. *Appl. Sci.* 2020, 10(12), 4077; <https://doi.org/10.3390/app10124077>
8. Saif Ullah, Khalid Hussain Mohammadani, Muhammad Asghar Khan, Zhi Ren, Reem Alkanhel, Ammar Muthanna and Usman Tariq, Position-Monitoring-Based Hybrid Routing Protocol for 3D UAV-Based Networks. *Drones* 2022, 6(11), 327; <https://doi.org/10.3390/drones6110327>
9. Ghulam E. Mustafa Abro, Saiful Azrin B. M. Zulkifli, Rana Javed Masood, Vijanth Sagayan Asirvadam and Anis Laouiti, Comprehensive Review of UAV Detection, Security, and Communication Advancements to Prevent Threats. *Drones* 2022, 6(10), 284; <https://doi.org/10.3390/drones6100284>
10. Asmaa Abdallah, M. Zulfiker Ali, Jelena Mišić and Vojislav B. Mišić, Efficient Security Scheme for Disaster Surveillance UAV Communication Networks. *Information* 2019, 10(2), 43; <https://doi.org/10.3390/info10020043>
11. Marlena Robakowska, Daniel Ślęzak, Przemysław Żuratyński, Anna Tyrańska-Fobke, Piotr Robakowski, Paweł Prędkiewicz and Katarzyna Zorena, Possibilities of Using UAVs in Pre-Hospital Security for Medical Emergencies. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19(17), 10754; <https://doi.org/10.3390/ijerph191710754>
12. Khalifa AL-Dosari and Noora Fetais, A New Shift in Implementing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Safety and Security of Smart Cities: A Systematic Literature Review. *Safety* 2023, 9(3), 64; <https://doi.org/10.3390/safety9030064>
13. Wedad Alawad, Nadhir Ben Halima and Layla Aziz, An Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System for Disaster and Crisis Management in Smart Cities. *Electronics* 2023, 12(4), 1051; <https://doi.org/10.3390/electronics12041051>
14. Nadir Abbas, Zeshan Abbas, Xiaodong Liu, Saad Saleem Khan, Eric Deale Foster and Stephen Larkin, A Survey: Future Smart Cities Based on Advance Control of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Appl. Sci.* 2023, 13(17), 9881; <https://doi.org/10.3390/app13179881>
15. Vyacheslav Kharchenko, Ihor Kliushnikov, Andrzej Rucinski, Herman Fesenko and Oleg Illiashenko, UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application. *Smart Cities* 2022, 5(3), 1151-1178; <https://doi.org/10.3390/smartcities5030058>
16. Adiel Ismail, Bigomokero Antoine Bagula and Emmanuel Tuyishimire, Internet-Of-Things in Motion: A UAV Coalition Model for Remote Sensing in Smart Cities. *Sensors* 2018, 18(7), 2184; <https://doi.org/10.3390/s18072184>
17. Enrico Petritoli, Fabio Leccese, and Lorenzo Ciani, Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors* 2018, 18(9), 3171; <https://doi.org/10.3390/s18093171>
18. Krzysztof Andrzej Gromada and Wojciech Marcin Stecz, Designing a Reliable UAV Architecture Operating in a Real Environment. *Appl. Sci.* 2022, 12(1), 294; <https://doi.org/10.3390/app12010294>
19. Ning Ning, Suiping Zhou, Weimin Bao and Xiaoping Li, A Study on the Maximum Reliability of Multi-UAV Cooperation Relay Systems. *Sensors* 2024, 24(9), 2886; <https://doi.org/10.3390/s24092886>
20. Taha Elmokadem and Andrey V. Savkin, Towards Fully Autonomous UAVs: A Survey. *Sensors* 2021, 21(18), 6223; <https://doi.org/10.3390/s21186223>
21. Nurul I. Sarkar, and Sonia Gul, Artificial Intelligence-Based Autonomous UAV Networks: A Survey. *Drones* 2023, 7(5), 322; <https://doi.org/10.3390/drones7050322>
22. Victor M. Becerra, Autonomous Control of Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics* 2019, 8(4), 452; <https://doi.org/10.3390/electronics8040452>
23. Krzysztof Mateja, Wojciech Skarka, Magdalena Peciak, Roman Niestrój and Maik Gude, Energy Autonomy Simulation Model of Solar Powered UAV. *Energies* 2023, 16(1), 479; <https://doi.org/10.3390/en16010479>
24. Paula Fraga-Lamas, Lucía Ramos, Víctor Mondéjar-Guerra and Tiago M. Fernández-Caramés, A Review on IoT Deep Learning UAV Systems for Autonomous Obstacle Detection and Collision Avoidance. *Remote Sens.* 2019, 11(18), 2144; <https://doi.org/10.3390/rs11182144>
25. Yassine Yazid, Imad Ez-Zazi, Antonio Guerrero-González, Ahmed El Oualkadi and Mounir Arioua, UAV-Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on AI: A Comprehensive Review. *Drones* 2021, 5(4), 148; <https://doi.org/10.3390/drones5040148>
26. Anis Koubaa, Adel Ammar, Mohamed Abdelkader, Yasser Alhabashi and Lahouari Ghouti, AERO: AI-Enabled Remote Sensing Observation with Onboard Edge Computing in UAV. *Remote Sens.* 2023, 15(7), 1873; <https://doi.org/10.3390/rs15071873>
27. Petros S. Bithas, Emmanouel T. Michailidis, Nikolaos Nomikos, Demosthenes Vouyioukas and Athanasios G. Kanatas, A Survey on Machine-Learning Techniques for UAV-Based Communications. *Sensors* 2019, 19(23), 5170; <https://doi.org/10.3390/s19235170>
28. Roghieh Eskandari, Masoud Mahdianpari, Fariba Mohammadimanesh, Bahram Salehi, Brian Brisco and Saeid Homayouni, Meta-analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Agro-environmental Monitoring Using Machine Learning and Statistical Models. *Remote Sens.* 2020, 12(21), 3511; <https://doi.org/10.3390/rs12213511>
29. Vittorio Mazza, Lorenzo Comba, Aleem Khaliq, Marcello Chiaberge and Paolo Gay, UAV and Machine Learning Based Refinement of a Satellite-Driven Vegetation Index for Precision Agriculture. *Sensors* 2020, 20(9), 2530; <https://doi.org/10.3390/s20092530>
30. Chamali Sandamini, Madduma Wellalage Pasan Maduranga, Valmik Tilwari, Jamaiah Yahaya, Faizan Qamar, Quang Ngoc Nguyen and Siti Rohana Ahmad Ibrahim, A Review of Indoor Positioning Systems for UAV Localization with Machine Learning Algorithms. *Electronics* 2023, 12(7), 1533; <https://doi.org/10.3390/electronics12071533>

31. Geun-Ho Kwak and No-Wook Park, Impact of Texture Information on Crop Classification with Machine Learning and UAV Images. *Appl. Sci.* 2019, 9(4), 643; <https://doi.org/10.3390/app9040643>
32. Hisham Khalil, Saeed Ur Rahman, Inam Ullah, Inayat Khan, Abdulaziz Jarallah Alghadhban, Mosleh Hmoud Al-Adhaileh, Gauhar Ali and Mohammed ElAffendi, A UAV-Swarm-Communication Model Using a Machine-Learning Approach for Search-and-Rescue Applications. *Drones* 2022, 6(12), 372; <https://doi.org/10.3390/drones6120372>
33. Daniel H. Stolfi and Grégoire Danoy, An Evolutionary Algorithm to Optimise a Distributed UAV Swarm Formation System. *Appl. Sci.* 2022, 12(20), 10218; <https://doi.org/10.3390/app122010218>
34. Ángel Madridano, Abdulla Al-Kaff, David Martín and Arturo de la Escalera, 3D Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies. *Sensors* 2020, 20(3), 642; <https://doi.org/10.3390/s20030642>
35. Abhishek Phadke and F. Antonio Medrano, Towards Resilient UAV Swarms—A Breakdown of Resiliency Requirements in UAV Swarms. *Drones* 2022, 6(11), 340; <https://doi.org/10.3390/drones6110340>
36. Rui Ming, Rui Jiang, Haibo Luo, Taotao Lai, Ente Guo and Zhiyan Zhou, Comparative Analysis of Different UAV Swarm Control Methods on Unmanned Farms. *Agronomy* 2023, 13(10), 2499; <https://doi.org/10.3390/agronomy13102499>
37. Xudong Deng, Mingke Guan, Yunfeng Ma, Xijie Yang and Ting Xiang, Vehicle-Assisted UAV Delivery Scheme Considering Energy Consumption for Instant Delivery. *Sensors* 2022, 22(5), 2045; <https://doi.org/10.3390/s22052045>
38. Jianxun Li, Hao Liu, Kin Keung Lai and Bhagwat Ram, Vehicle and UAV Collaborative Delivery Path Optimization Model. *Mathematics* 2022, 10(20), 3744; <https://doi.org/10.3390/math10203744>
39. Young Kwan Ko, Ju Hyeong Park and Young Dae Ko, A Development of Optimal Algorithm for Integrated Operation of UGVs and UAVs for Goods Delivery at Tourist Destinations. *Appl. Sci.* 2022, 12(20), 10396; <https://doi.org/10.3390/app122010396>
40. Fang Li and Oliver Kunze, A Comparative Review of Air Drones (UAVs) and Delivery Bots (SUGVs) for Automated Last Mile Home Delivery. *Logistics* 2023, 7(2), 21; <https://doi.org/10.3390/logistics7020021>
41. Emanuel Jesús Ulin Hernández, Jania Astrid Saucedo Martínez and José Antonio Marmolejo Saucedo, Optimization of the Distribution Network Using an Emerging Technology. *Appl. Sci.* 2020, 10(3), 857; <https://doi.org/10.3390/app10030857>
42. Diyar Altinses, David Orlando Salazar Torres, Michael Schwung, Stefan Lier and Andreas Schwung, Optimizing Drone Logistics: A Scoring Algorithm for Enhanced Decision Making across Diverse Domains in Drone Airlines. *Drones* 2024, 8(7), 307; <https://doi.org/10.3390/drones8070307>
43. DroneARchery: Human-Drone Interaction through Augmented Reality with Haptic Feedback and Multi-UAV Collision Avoidance Driven by Deep Reinforcement Learning, available at: <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2210.07730> (accessed August, 2024).
44. Ihor Kliushnikov, Vyacheslav Kharchenko, Herman Fesenko, Multi-UAV Routing for Critical Infrastructure Monitoring Considering Failures of UAVs: Reliability Models, Rerouting Algorithms, Industrial Case, available at: https://www.researchgate.net/profile/Elena-Zaitseva-2/publication/353590931_Multi-UAV_Routing_for_Critical_Infrastructure_Monitoring_Considering_Failures_of_UAVs_Reliability_Models_Rerouting_Algorithms_Industrial_Case/links/61124f10169a1a0103ee1d92/Multi-UAV-Routing-for-Critical-Infrastructure-Monitoring-Considering-Failures-of-UAVs-Reliability-Models-Rerouting-Algorithms-Industrial-Case.pdf (accessed August, 2024).
45. Herman Fesenko, Oleg Illiashenko, Vyacheslav Kharchenko, Ihor Kliushnikov, Olga Morozova, Anatoliy Sachenko and Stanislav Skorobohatko, Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones* 2023, 7(7), 409; <https://doi.org/10.3390/drones7070409>
46. Yun Sun, Herman Fesenko, Vyacheslav Kharchenko, Luo Zhong, Ihor Kliushnikov, Oleg Illiashenko, Olga Morozova and Anatoliy Sachenko, UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application. *Sensors* 2022, 22(17), 6444; <https://doi.org/10.3390/s22176444>

Received (Надійшла) 24.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

Mobile logistics and monitoring systems based on UAV swarms: challenges and development directions

O. Kriuchenkov, O. Morozova, T. Nikitina

Abstract. With the development of technology and the active digitalization of aspects of life from transport to trade, there is a growing need to create reliable mobile logistics systems based on swarms of unmanned aerial vehicles (UAVs). The use of UAV swarms can significantly improve the efficiency of logistics and monitoring operations, ensuring safety and optimizing costs through the collection and analysis of data for real-time decision-making. The main goal of this article is to review the methods and software tools that ensure the reliable operation of mobile logistics and monitoring systems based on UAV swarms. Key areas of activity are also considered with examples of their application, characteristic features, problems, limitations and advantages. The article also outlines the general challenges and limitations in this field. The paper proposes the concept of using UAV swarms to solve logistical and monitoring tasks that increase work efficiency and reduce the risk of unforeseen situations during the life cycle of operations. There are three main approaches to implementing such systems: autonomous UAV swarms, operator-controlled swarms, and hybrid systems. In addition, the application of UAV swarms in various fields of activity, such as the delivery of goods, monitoring of warehouses and infrastructure, as well as support of search and rescue operations, is considered. The concept of mobile logistics and monitoring systems based on UAV swarms can be implemented in almost all industries, but this article focuses on the most common areas that have significantly influenced the development of such systems. An analysis of the main fields of application of UAV swarms was carried out, the features and problems of their use in each of the considered spheres of activity were determined. The challenges, advantages and specifics of using UAV swarms were summarized.

Keywords: UAV swarms, mobile logistics systems, unmanned aerial vehicles, logistics efficiency, autonomous control systems, digitalization of logistics, big data processing, data security, standardization, fault tolerance, route optimization.