

УДК 681.516+004.932.2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-8

Журавська І. М.¹, Тонха О. Л.², Нечай І. В.², Гуменюк Т. В.³¹Чорноморський національний університет імені Петра Могили²Національний університет біоресурсів і природокористування України³Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БПЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В ПРОСТОРОВОМУ КОРИДОРІ НА БАЗІ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ

У статті розглянуто проблему керування групою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або дронів, що виконують завдання у просторових коридорах із високою швидкістю зміни характеристик середовища. Робота акцентує увагу на неоднорідності дронів, їх різній конструкції, функціях, обчислювальних можливостях і типах каналів зв'язку, що утворюють складну динамічну гетерогенну мережу. Систематизовано міжнародні класифікації БПЛА та визначено актуальність дослідження в умовах зростання масштабу та складності операційних сценаріїв. Значна увага приділена поняттю швидкодинамічних процесів, які визначають вимоги до алгоритмів обробки інформації та прийняття рішень у групових системах. У роботі проаналізовано сучасні дослідження у сфері комп'ютерного зору, децентралізованої координації та мережесвих рішень для роїв дронів. Показано, що інтеграція алгоритмів, моделювання, симуляції та візуальних методів дозволяє суттєво підвищити точність навігації та можливість виявлення перешкод у стислому просторі (вузьких коридорах) при груповій взаємодії. Автори пропонують модель вибору цілей та розподілу задач між суброями БПЛА, що базується на аналізі матриці відстаней, а також застосування алгоритмів типу нейронної мережі Гопфілда для швидкого досягнення стабільного режиму спільної роботи. Окремо підкреслюється важливість симуляції руху БПЛА у 3D-просторі для дослідження поведінки рою та оптимізації уникнення зіткнень. Запропонований підхід дозволяє ефективно моделювати взаємодію елементів рою в умовах обмеженої інформації та динамічного середовища. Результати роботи можуть бути використані у системах логістики, автоматизованих складах, критичних інфраструктурах і для проектування систем керування роями БПЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат (БПЛА), субрій дронів, гетерогенна мережа, розподілена система, маршрутизація, стислий простір, безпечна навігація, комп'ютерний зір, обробка зображень, нейронна мережа Гопфілда, система автоматичного керування, інформаційно-комп'ютерна система, багаторівневий аналіз відео-зображення.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) має велике значення в усіх сферах життя. БПЛА (або дрони) мають різноманітні конструктивні рішення в залежності від їх призначення (цільового об'єкта). Слід також зазначити, що окрім різних конструкцій БПЛА у межах спільної групи, можуть відрізнятися також комп'ютерні компоненти, з яких складаються дрони, їх виробники, канали зв'язку між дронами у межах групи тощо. Ця характеристика групи дронів називається гетерогенністю або неоднорідністю. Термін «гетерогенність» все частіше використовується в класифікації різних інформаційних технологій та комп'ютерних мереж [1; 2]. Парадигму гетерогенних комп'ютерних мереж (англ. Heterogeneous Network або HetNet) також можна розглядати з точки зору зміни топології утвореної мережі під час роботи групи дронів. З огляду на неоднорідність групи дронів, слід також враховувати класифікації БПЛА з урахуванням їх злітної маси та радіусу дії [3], а також типу керування [4]; дані класи представлені в табл. 1.

Серед країн-членів НАТО, як і в Україні, типові обмеження ваги для різних класів транспортних засобів також становлять 25 кг (клас I), 150 кг (клас II) та 600 кг (клас III). У межах цих класів БПЛА поділяються на 7 категорій. Різні організації в США (НАТО, Міністерство оборони США, НАСА, Федеральне авіаційне управління США тощо) мають визначені групи або класи БПЛА [5]. Більшість цих класифікацій базуються на вазі та висоті або швидкості. Наприклад, НАСА поділяє БПЛА на три категорії в залежності від ваги, повітряної швидкості, льотної придатності, конфігурації, управління та рівня безпеки – для досліджень в галузі атмосферних наук [6]. Згідно з Міжнародною класифікацією повітряного простору, дрони поділяються на 6 класів (A–G) залежно від здатності працювати на певній висоті над рівнем моря (до 60'000 футів над рівнем моря). Агентство з авіаційної безпеки Європейського Союзу (EASA)

створює загальноєвропейську систему з трьома категоріями експлуатації дронів – «відкрита» (для літальних апаратів з низьким рівнем ризику вагою до 25 кг), «спеціальна» (для польотів дронів потрібен дозвіл) або «сертифікована» (категорія найвищого ризику, – експлуатація дронів для доставки або пасажирських перевезень, або польоти над великими групами людей) – кожна з власним набором правил та індивідуальною ідентифікацією [7].

Таблиця 1 – Класифікація БПЛА

Класифікація БПЛА за злітною масою та радіусом дії	Класифікація БПЛА за типом керування
<ul style="list-style-type: none"> • I-й клас (мікро, міні, малі) – до 150 кг та зоною прямої видимості до 50 км; • II-й клас (тактичні) – від 150 кг до 600 кг та зоною прямої видимості до 200 км; • III-й клас (оперативні, стратегічні) – понад 600 кг та поза зоною прямої видимості. 	<ul style="list-style-type: none"> • ручні (FPV та прості, без камер); • автономні (з використанням штучного інтелекту або фіксованих алгоритмів); • напівавтономні.

Не можна заперечувати, що дрони різних рівнів класифікації можуть взаємодіяти один з одним. Але зростання гетерогенності призводить до значного збільшення складності управління пристроями та послугами всередині групи дронів і вимагає більш глибоких досліджень процесів побудови та ефективності послуг у цих мережах. Саме гетерогенність впроваджених рішень може забезпечити масштабованість комунікаційних послуг між БПЛА при критичному застосуванні у надзвичайних ситуаціях, у місцях лиха та екстремальних умовах.

Аналіз останніх досліджень.

Різними вченими проводяться дослідження в області гетерогенних мереж для БПЛА. Дослідження [8]. показує, що комп'ютерний зір може забезпечувати стабільну навігацію БПЛА у вузьких просторах завдяки поєднанню геометричних методів і глибинних мереж. Автори демонструють, що легковагові алгоритми візуальної локалізації здатні працювати в реальному часі на борту малих дронів. Робота акцентує на важливості прогнозування руху та швидкого виявлення перешкод. У роботі [9] наголошено, що задля скорочення часу на аналіз та обробку зображень з бортових систем спостереження доцільно зменшити площу обробленого зображення для подальшого розпізнання об'єктів інтересу. У роботі [10] наголошено, що для раціонального використання ресурсу рою ударних БПЛА необхідно врахування під час моделювання несиметричного конфлікту «неоднорідний рій БПЛА – різнорідні цільові об'єкти». В роботі [11] пропонується метод керування в реальному часі, що дозволяє гетерогенним БПЛА узгоджено планувати траєкторії під час групового польоту. Модель враховує різні динамічні можливості апаратів, що робить її придатною для змішаних роїв. У роботі підкреслено важливість швидких алгоритмів оптимізації для уникнення зіткнень у складних середовищах. В роботі [12] досліджується продуктивність гетерогенних мереж зв'язку у стислому просторі повітряних коридорів, використовуючи стохастичну геометрію. Дослідження демонструє, що правильне розташування повітряних ретрансляторів суттєво впливає на надійність каналу. Автори вказують на критичність латентності зв'язку для безпечної координації БПЛА. У роботі [13] представлено гетерогенний рій, де більші БПЛА виконують роль обчислювальних і комунікаційних вузлів, а малі – функції ближнього огляду та взаємодії з середовищем. Архітектура доводить ефективність розподіленого інтелекту та децентралізованого керування. Автори демонструють зниження навантаження на зв'язок завдяки використанню семантичних даних замість відеопотоків. В [14] Дуан і співавтори пропонують кооперативний метод планування шляхів для багатьох БПЛА у складних просторових маршрутах. Алгоритм працює розподілено, дозволяючи дронам погоджувати наміри без централізованого контролера. У роботі показано, що підхід ефективний навіть за часткових втрат зв'язку.

Згідно з наведеними дослідженнями можна зробити висновок, що використання гетерогенної мережі, де кожен БПЛА виконує спеціалізовані функції, дозволяє підвищити стійкість системи до перешкод, збоїв зв'язку та відмов окремих агентів. Додатково, інтеграція комп'ютерного зору забезпечує здатність дронів самостійно орієнтуватися, уникати зіткнень та розпізнавати об'єкти.

Мета роботи полягає в розробці моделі гетерогенної мережі для координації та керування групою БПЛА у просторовому коридорі з використанням комп'ютерного зору, яка забезпечує безпечну навігацію, стійкий зв'язок та запобігання зіткнень.

Викладення основного матеріалу. Гетерогенні бездротові мережі зараз підтримуються новітніми технологічними досягненнями в галузі бездротового зв'язку, а також інтеграцією різних функцій, таких як зондування, зв'язок, розвідка та проактивна діяльність. Ці мережі характеризуються здатністю обробляти великі дані з біологічної, хімічної та інших галузей промисловості для приватних, промислових, медичних, технічних, військових цілей та моніторингу навколишнього середовища. В процесі розвитку групи БПЛА вони стають більш динамічними. Характеристика «динамізм» потребує більш детального розгляду, оскільки зростає не лише складність цих мережевих систем та їх компонентів (сенсорів), але й швидкість руху дронів та обсяг їхніх завдань (рис. 1).

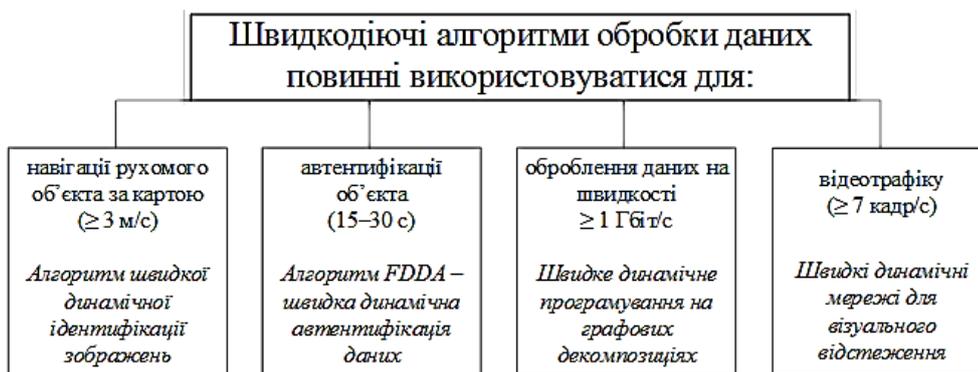


Рисунок 1 – Швидкодинамічні процеси в групі дронів

На відміну від звичайних «динамічних систем», які є детермінованими і можливо визначити множину всіх можливих станів такої системи в будь-який заданий момент часу, для «швидкодинамічних систем» неможливо однозначно передбачити всю їхню подальшу поведінку. Навіть знаючи координати та швидкість такої системи в початковий момент часу, неможливо заздалегідь визначити механічну перешкоду або електромагнітні перешкоди, з якими зіткнеться мобільна швидкодинамічна система (група дронів) під час роботи. Це може бути втрата якості сигналу зв'язку, руйнування топології групи та інші фактори, що потребують дослідження подальшого функціонування такої інформаційної системи. У цьому випадку в інформаційних системах обробка даних виконується на швидкостях гігабіт/с (Гбіт/с) для запобігання або виходу з критичної ситуації. Термін «швидка динаміка» був започаткований у 2014 р. на факультетах комп'ютерної інженерії та інформатики в Університеті Делавер (одному з перших університетів США) і розширився до теперішнього часу, коли у 2018 р. на академічних стандартах Корнельського університету (одного з 8 членів Ліги Плюща) було наголошено на необхідності впровадження швидких динамічних алгоритмів замість традиційних при відеотрафіку понад 1 Гбіт/с або 7 кадрів/с [15]. Незалежно від типу оброблюваних даних, виходячи з «швидкодинамічних процесів», вибір апаратного забезпечення дрона визначається тим, наскільки швидко він може обробити сигнал і як швидко він може переключитися на інше завдання.

Розглядаючи групу дронів, доцільно виділити такі етапи її управління: до інциденту, під час критичного застосування та після інциденту. У цьому випадку функції критичного застосування на основі групи дронів можна визначити за розробленою класифікацією, наведеною на рисунку 2.

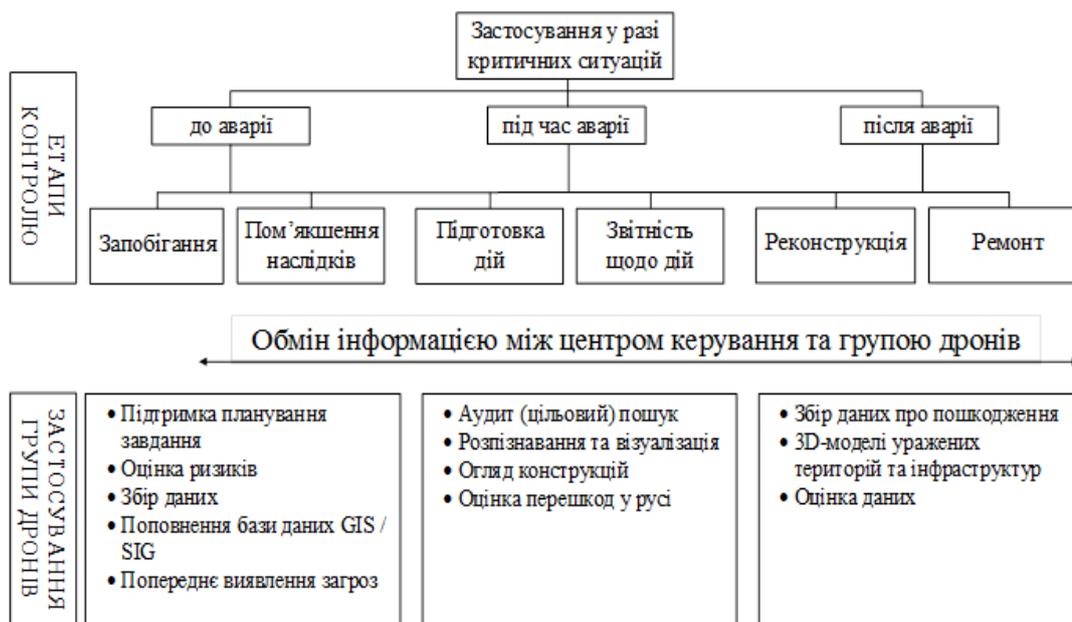


Рисунок 2 – Функції інформаційної системи при критичному застосуванні груп дронів

Для апаратної та програмної реалізації компоненти (модулі) БПЛА необхідно розділити за їхньою функцією. Таку класифікацію слід розглядати з точки зору моделі взаємодії відкритих систем – ISO/OSI або DoD (TCP/IP). Наприклад, у моделі DoD компоненти (модулі) БПЛА можна розділити на шари. Таким чином, для забезпечення функціонування групи дронів у різних технологіях необхідно враховувати всі розглянуті фактори – і неоднорідність, і швидкодинамічність, і особливості роботи групи дронів у критичних умовах. В іншому випадку теоретичні моделі, які переконливо працювали на екранах комп'ютерів, будуть дестабілізовані в реальному світі за наявності затримок, невизначеностей та кінематичних обмежень.

Одним із найперших прикладів досліджень у галузі групового керування був «проект MARTHA», виконаний у Лабораторії аналізу системних архітектур Франції у 1998 році [16]. Метою цього проекту була розробка методів організації групової взаємодії роботів (від 10 шт. до 100 шт.), призначених для транспортування вантажів у складських терміналах. Проект MARTHA використовував централізоване управління групою роботів, при якому планування дій кожної групи роботів здійснюється одним центральним пристроєм керування (рис. 3). Концепція проекту MARTHA полягає в наступному. Система керування групою роботів складається з двох основних частин: центру керування (ЦК) та бортових комп'ютерів з модулем зв'язку. ЦК встановлюється стаціонарно в командному центрі та вирішує завдання планування дій усієї групи роботів. Крім того, ЦК забезпечує оператора-людину кожним роботом групи на випадок непередбачених ситуацій, а також використовується для постановки цільового завдання. На борту кожного робота встановлено обчислювальний пристрій, який призначений для вирішення задачі руху до заданої мети. Контролер зв'язку служить для зв'язку з центральною станцією та іншою групою роботів.

За такими умовами має місце розподілена система – сукупність взаємодіючих дронів, які діють як єдиний комплекс для виконання завдань, центру керування та каналів зв'язку між ними.

У сучасних умовах взаємодію БПЛА у рою необхідно планувати з урахуванням специфіки децентралізованого управління, обмеженої інформації, змін цілерозподілу й характеристик середовища та потенційних конфліктів інтересів між окремими апаратами [10; 17].

Для взаємодії дронів у групі безпілотників необхідно вирішити проблеми збільшення відповідного часу роботи комп'ютерних компонентів, забезпечити можливість використання відкритих каналів зв'язку (аеропорти, військовий та цивільний транспорт тощо) в межах території дії такого угруповання для обміну інформацією з ЦК, незалежно від специфіки країни, де вона використовується. При цьому слід також звернути увагу на забезпечення стійкості та захисту інформації, якою обмінюється група безпілотників та ЦК. Виходячи з середовища, детермінованого чи недетермінованого, в якому функціонує група дронів, визначаються два

підходи до управління мобільним модулем: управління в детермінованому та недетермінованому середовищі.

У випадку детермінованого середовища, система керування може повністю обчислювати траєкторію руху за вже відомими алгоритмами. Цей підхід базується на тому, що система керування має всю необхідну інформацію про перешкоди в зоні своєї відповідальності, тобто має електронну карту місцевості, і може побудувати безпечний та оптимальний маршрут. Таке рішення є більш ефективним, оскільки маршрути можна розрахувати заздалегідь і не вимагатиме від групи дронів постійного коригування маршруту. Від дрона потрібне лише «сліпе» виконання команд ЦК, що, в свою чергу, знижує вимоги до апаратного забезпечення самої групи дронів. Водночас, додаткова електронна карта стану є обов'язковою умовою для роботи таких систем.

Вирішення проблеми в недетермінованих середовищах ускладнюється тим, що модуль керування знає лише початкові та кінцеві координати, які повинна «відвідати» група дронів. Усі завдання з розрахунку траєкторії маршруту передаються на дрони, тим самим ускладнюючи апаратну та програмну частину роботи. Так, для проходження певного маршруту дрон повинен визначити, чи може він продовжувати рух в тому чи іншому напрямку. В такому разі він повинен сам побудувати локальну карту перешкод середовища, в якому він знаходиться, і лише потім рухатися до мети. Хоча цей метод підвищує автономність кожного елемента групи, водночас він не є вигідним для використання в управлінні мережами моніторингу, оскільки призведе до зростання вартості кожного елемента мережі, ймовірність втрати якого дуже висока в умовах критичного застосування.

Оскільки обмін інформацією всередині рою обмежений, використання алгоритмів пошуку шляхів (таких як алгоритми Дейкстри, алгоритм Лі тощо) не буде ефективним у процесі досягнення мети. Найкращим варіантом є планування скоординованих дій у розподіленій системі та подальшого послідовного дотримання цього плану. На початку для кожного дрона роя необхідно зробити початковий вибір місця, щоб оцінити свою ефективність інших варіантів вибору. Для кожного БПЛА визначається найближча ціль.

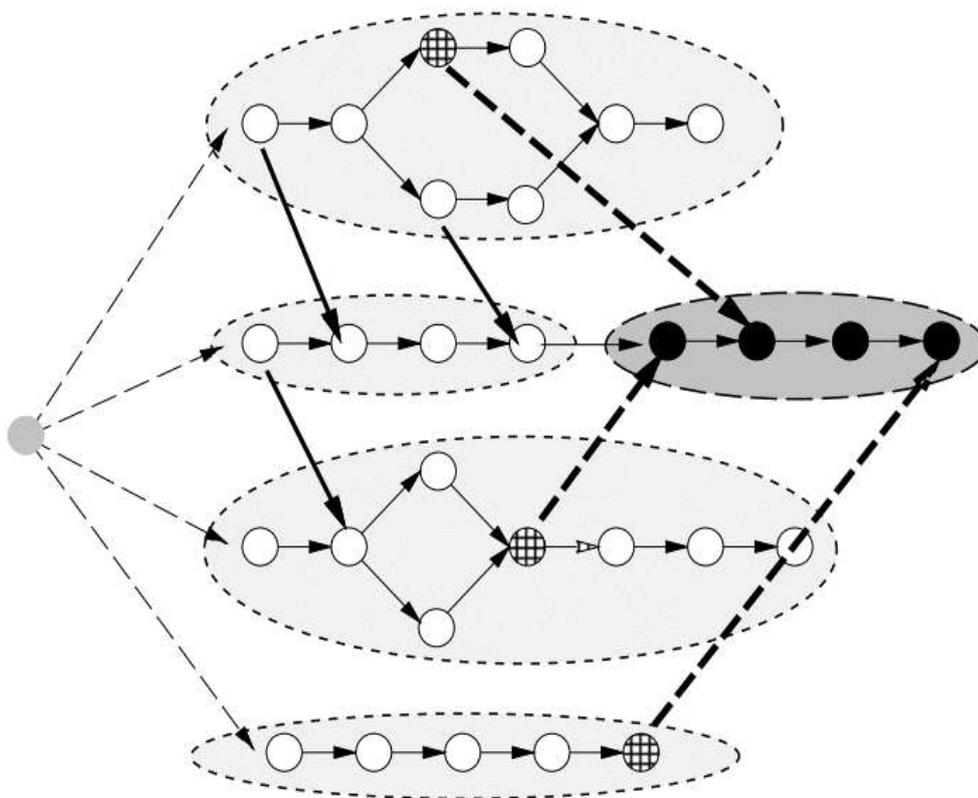


Рисунок 3 – Структура мережевої взаємодії транспортних безпілотних апаратів у проєкті MARTHA (Франція, 1998) при централізованому керуванні [16]

Вибір цілі здійснюється за допомогою спеціального вибору матриці:

$$T = \|t_{ij}\|, (i = 0, 1, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m). \quad (1)$$

Матриця (1) має розмір $n \times m$, де n – загальна кількість дронів; m – кількість цілей, X_{nm} – відстань, яку потрібно досягти для клітин із цілями m . Кожен дрон обчислює мінімальне значення $X_{nm \min}$ і вважає його найоптимальнішим. Потім перевіряється відстань, і дрони, які мають найменшу відстань і не мають інших проблем, беруться за виконання завдання. Після цих операцій вибір цілей здійснюється знову. Якщо цілі не змінюються, приймається обраний план.

Отже, з'являється можливість оцінити реальний час, протягом якого дрон досягає цілей, не враховуючи всі можливі перешкоди на його шляху. Ця схема дозволяє дійсно обрати оптимальний план. Щоб впровадити відповідальність за динаміку навколишнього середовища (здатність відстежувати рух інших дронів), слід отримувати нові дані після певного періоду часу та можливих перекриттів маршрутів, перш ніж встановити ієрархію зупинок дронів.

Наступна модель представлена множиною моделей меншого обсягу (2):

$$M_{sm} = \langle MMO, MC, MIE, VU, VE, VY, VZ, S, F1, F2 \rangle, \quad (2)$$

де MMO – модель керованого об'єкта (MO), яка описує стан і характеристики дрона; MC – модель контролера, яка описує принципи роботи дронів; MIE – модель внутрішніх подій, яка описує випадкові події та їхні характеристики; VU – множина контрольованих і керованих параметрів: динамічні (мобільні) перешкоди на шляху дрона, характеристики роботи (швидкість руху, швидкість збору, максимальний заряд батареї, вага вантажу тощо); VE – множина випадкових збурень, які раптово виникають як динамічні перешкоди при русі дрону за рандомно заданим випадковим маршрутом; VY – множина вихідних параметрів, що використовуються в контролері: координати дрона, його стан і середовище пересування; VZ – множина вихідних параметрів поведінки дрона в заданих умовах; S – множина режимів системи: усі можливі комбінації елементів множин VU, VE, VY, VZ ; $F1$ – функція генерації керуючого вектора: правила та процедури, що відповідають за встановлення нових значень керованих параметрів; $F2$ – функція, що відображає вхідні параметри MO на його вихід: правила та процедури, за допомогою яких обчислюється значення вихідних параметрів.

Особливу увагу слід приділяти вирішенню проблем, подібних до «задачі комівояжера», в окремих просторових коридорах. За такої швидкості неможливо обчислити сталий режим мережі дронів шляхом послідовного наближення помилки. Усі коефіцієнти матриці (1) слід обчислити за один цикл, після чого загальна мета для ройових дронів поділяється на підзавдання (для кожного з суброїв). Мережа на цьому етапі переходить у стабільний режим і залишається в ньому. Це означає, що після розподілу підзавдань у суброїв дронів ці завдання не будуть перерозподілені до їх реалізації.

Таке формулювання алгоритму є найближчим до алгоритму навчання мережі Хопфілда [18], де ознакою знаходження рішення є такий стабільний режим, який збігається з одним із збережених режимів під час навчання. Враховуючи той факт, що розташування цільових об'єктів у просторі не змінюється, цей конкретний об'єкт наступного разу (при наступній ітерації) буде знайдено в тому ж місці без помилок. Логічно розглядати синхронний режим функціонування мережі Гопфілда.

З іншого боку комп'ютерний зір відіграє ключову роль у забезпеченні автономності, безпеки та ефективної координації рою БПЛА, що працює у стислому просторі або повітряних коридорів, або приміщень. За такими умовами дрони не завжди можуть покладатися на дані GPS чи далекодістанційних сенсорів, мають обмежений доступ до традиційної навігаційної інфраструктури, а рівень перешкод суттєво зростає. Саме в таких умовах комп'ютерний зір стає основним інструментом для аналізу навколишнього середовища в реальному часі. Комп'ютерний зір дозволяє дронам виявляти статичні й рухомі об'єкти: стіни, виступи, інженерні конструкції, інші БПЛА, людей або техніку. За допомогою методів сегментації, класифікації та виділення контурів система формує локальну карту оточення з високою точністю, що життєво необхідно в обмеженому просторі. Для групи БПЛА комп'ютерний зір дозволяє не тільки бачити перешкоди, а й ідентифікувати інших учасників рою, прогнозувати їхню траєкторію та адаптувати власний курс. Це знижує навантаження на канали зв'язку, оскільки частину інформації дрон отримує локально з камер, а не лише через мережевий обмін.

Була змодельована робота суброю, який рухається у своєму просторовому коридорі. Такий субрій складається з двох пов'язаних між собою механізмів одного дрона, що виконують асинхронні задачі в одному просторовому коридорі (рис. 4). При цьому кожен механізм може виконувати окреме завдання у різних просторових координатах та/або в різний час. Наприклад, в якості таких механізмів може бути використана подвійна система асинхронного скиду із навіскою різноманітних вантажів, наведена на рис. 5 [19].

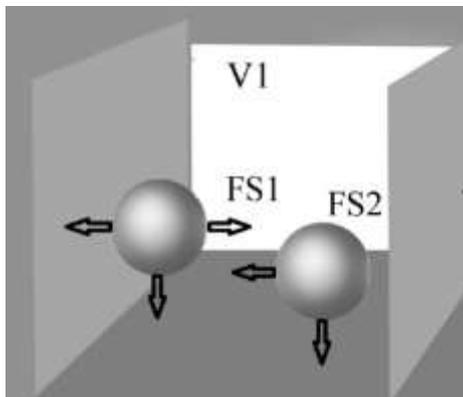


Рисунок 4 – Субрій, що складається з двох пов'язаних між собою механізмів одного дрона



Рисунок 5 – Подвійна система асинхронного скиду із навіскою різноманітних вантажів

Однак із зростанням кількості суброїв в одному коридорі ускладнюється процес централізованого керування. Суброї можуть мати різні напрямки руху залежно від поставлених цілей, структури просторового коридору та необхідності уникнення перешкод. Продуктивність виконання місії суттєво підвищується тоді, коли завдання раціонально розподіляються між двома або кількома дронами одного рою. Це дає змогу скоротити загальний час досягнення цілей, зменшити навантаження на окремий апарат і забезпечити більш ефективний огляд або доставку у складних умовах. Завдяки такому поділу зона покриття збільшується, а час реагування на ситуаційні зміни в коридорі значно скорочується.

Коли суброї виконують завдання сканування та вибору нерухомих об'єктів – кожен на своєму боці просторового коридору, – їхні режими одночасно змінюються на нові. Внаслідок цього вони можуть обмінюватися сторонами коридору між собою (рис. 6, б). Інакше вони можуть зіткнутися і зруйнувати роботу мережі. Тому необхідно моделювати паралельну роботу суброїв дронів, що застосовують послідовний алгоритм.

В такому разі необхідно окремо імітувати рух кожного суброю задля виявлення загрози зіткнень і уникнення таких зіткнень під час виконання завдання. Для того щоб обчислити нову позицію кожного дрона, інформаційно-комп'ютерна система повинна мати точні дані про його попереднє та поточне місцезнаходження, а також про оновлені координати найближчих апаратів. У повітряному просторі це особливо важливо, оскільки навіть невеликі зміщення сусіднього БПЛА можуть призвести до ризику зближення або зіткнення. Тому алгоритми планування траєкторій повинні враховувати динаміку руху рою, затримки передачі даних, можливі зміни швидкості та напрямків, а також прогнозувати поведінку найближчих членів групи.

Узгоджений рух БПЛА у спільному коридорі базується на постійному обміні телеметрією, оцінці відстаней і синхронізації маневрів у розподіленій системі. Чим більше апаратів працює одночасно, тим важливішими стають алгоритми запобігання конфліктам, локальної маршрутизації та адаптивного перерозподілу задач. У результаті загальна ефективність операції зростає не лише завдяки більшій кількості дронів, а й завдяки точності їхньої взаємодії та здатності рою колективно оптимізувати траєкторії в реальному часі.

Таблиця 2 – Час руху БПЛА між цілями в ручному режимі керування

Параметр	UAV-1	UAV-2
Тип	Малий квадрокоптер	Середній гексакоптер
Швидкість, м/с	4,0	5,0
Перешкоди	Колона (стовб) зліва, горизонтальна площа («полиця») зліва	Колона (стовб) справа, горизонтальна площа («полиця») справа
Загальна відстань, м	12,266	12,004
Середня швидкість (фактична), м/с	~4,0	~5,0
Час руху до цілі 1→2, с	0,503	0,346
Час руху до цілі 2→3, с	0,503	0,435
Час руху до цілі 3→4, с	0,503	0,425
Час руху до цілі 4→5, с	0,678	0,424
Час руху до цілі 5→6, с	0,746	0,425
Час руху до цілі 6→7, с	0,134	0,346
Загальний час руху, с	3,067	2,401

Для оцінки часу руху БПЛА в коридорі було здійснено тестові польоти в ручному режимі; результати такого тестування представлені в табл. 2. Оцінка руху двох БПЛА між цілями в ручному режимі (для FPV-дронів) повинна зосереджуватись на кількох ключових показниках: точності досягнення заданих точок, синхронності дій операторів, часі реакції на непередбачені перешкоди та ризику зіткнення. У ручному режимі оператори забезпечують високу гнучкість і можливість інтуїтивної корекції траєкторій, але водночас зростає навантаження на людину – особливо при одночасному контролі двох апаратів у вузькому просторовому коридорі. Необхідно порівняти заплановані та фактичні траєкторії (відхилення в метрах), виміряти затримки між командою оператора і реакцією БПЛА (latency), а також зафіксувати кількість і характер ручних корекцій (частота корекцій на хвилину). Критично важливі аспекти – стабільність каналу зв'язку та видимість операторів; при частих втратах відеопотоку або поганих погодних умовах точність знижується і безпека втрачається.

Рекомендується впровадити прості правила пріоритетів (який БПЛА має перевагу в просторі), запобіжні відстані між апаратами та процедури ручного взяття управління в разі рухомих перешкод. Для повної оцінки корисно провести серію тестових прогонів з реєстрацією телеметрії й відео, після чого статистично проаналізувати середні відхилення, максимальні затримки і число критичних інцидентів; на основі цього визначити, які елементи управління варто автоматизувати або підсилити підтримкою бачення (assistance) для зниження навантаження на оператора.

Кількість тактових циклів, необхідних для передачі актуальних позицій між БПЛА, зростає пропорційно кількості сусідніх апаратів, чие розташування слід враховувати під час перерахунку траєкторій. У рої, що рухається просторовим коридором, кожен дрон потребує оперативної інформації про швидкість, напрямок та маневри найближчих апаратів, що формує суттєве навантаження на комунікаційну підсистему. Це створює умови, за яких традиційні синхронні протоколи можуть спричинити затримки, тому доцільно звернутися до використання асинхронних підходів – зокрема, до впровадження мережі Гопфілда в асинхронному режимі.

Для моделювання групового руху декількох БПЛА у вузьких коридорах доцільно представляти кожен дрон у вигляді сфери з певним радіусом. Це дає можливість формально враховувати габарити апарата, а також створювати буферну зону безпеки, яка гарантує уникнення зіткнень під час зближення або перехресного руху. Така спрощена геометрична інтерпретація (аналогічна варіантам, зображеним на рис. 6, а, б) дозволяє ефективно моделювати поведінку рою без надмірного обчислювального ускладнення.

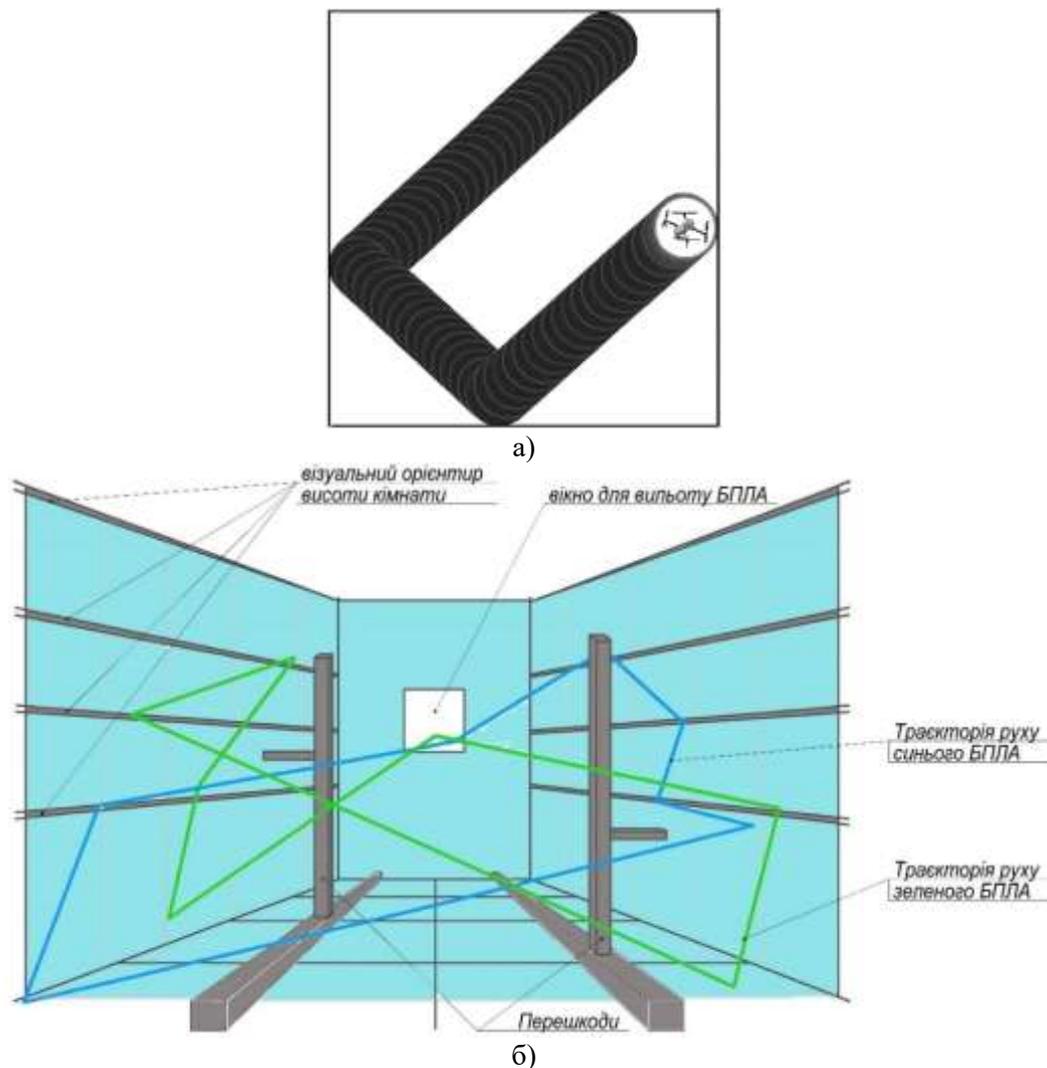


Рисунок 6 – Симуляція руху дронів у просторовому коридорі:
а – дрон як просторова точка; б – траєкторія руху дронів у суброю

Під час моделювання руху БПЛА враховуються три ключові просторові координати:

- перша координата визначає бічне положення у коридорі (ліворуч або праворуч від центральної осі);
- друга координата відповідає за фронтальну позицію вздовж довжини коридору;
- третя координата визначає висоту польоту, яка є критичною для уникнення вертикальних конфліктів.

Таке тривимірне представлення дозволяє досліджувати динаміку руху підрозділу БПЛА у задачах кооперативної навігації, коли декілька дронів одночасно рухаються по різних підкоридорах або на різних висотних рівнях. Моделювання поведінки рою з використанням асинхронної мережі Гопфільда може бути застосоване не лише для оптимізації маршрутів, а й для визначення безпечних зон маневру, формування колективної тактики уникнення перешкод та корекції польоту в реальному часі.

Подібне моделювання є особливо корисним під час відпрацювання сценаріїв застосування БПЛА в логістичних, інспекційних та рятувальних операціях, де коридори можуть мати обмежений простір, складну конфігурацію або значну присутність статичних і рухомих перешкод. Завдяки цьому підхід дозволяє підвищити ефективність взаємодії рою та мінімізувати ризики небезпечних зближень і втрат зв'язку.

Тому симуляція є вкрай важливим інструментом для дослідження поведінки рою БПЛА, адже вона дозволяє відтворити складну реальну систему за допомогою математичних моделей та простежити її динаміку у різних сценаріях польоту. Моделювання дає змогу аналізувати не лише загальну траєкторію руху групи дронів, а й оцінювати поведінку кожного об'єкта розподіленої системи, їхню реакцію на перешкоди, зміни швидкості, відхилення сусідів та перебудову формації. Особливо корисним є дослідження сегментованих моделей руху, коли рій

поділяється на підгрупи, що виконують різні завдання у межах одного коридору або багаторівневої повітряної структури. Запропоновані рішення є наближеними, але достатньо ефективними для практичного використання. Використання мережі Гопфілда забезпечує швидкий пошук прийнятних траєкторій без потреби у численних ітераціях чи глибоких оптимізаційних процедурах. Це особливо важливо у високодинамічних умовах, коли рій БПЛА повинен постійно коригувати напрямок польоту.

Побудова маршруту підрозділу дронів шляхом з'єднання кількох двовимірних рішень у тривимірну структуру дозволяє ефективно моделювати рух у складних повітряних коридорах, де одночасно враховуються висота, бокове зміщення та фронтальний рух. У високошвидкісних динамічних мережах, таких як рої БПЛА, це дає змогу уникати критичних затримок та збоїв у роботі системи керування.

Висновки. У роботі розкрито актуальність проблеми через ускладнення сценаріїв застосування БПЛА – від цивільних логістичних операцій до спеціальних місій у надзвичайних ситуаціях. Представлений аналіз класифікацій БПЛА різних міжнародних організацій дозволяє зробити висновок про тенденцію до зростання різноманітності флотів, що робить проблему керування ще більш складною. Автори звертають увагу на необхідність швидкодинамічних підходів, оскільки традиційні детерміновані методи виявляються недостатньо ефективними за умов швидких змін та непередбачуваних впливів. Значну увагу приділено проблематиці побудови маршруту руху БПЛА у недетермінованому середовищі, де апарат повинен самостійно формувати локальну карту перешкод і коригувати траєкторію. Продемонстровано обмеження класичних алгоритмів пошуку шляхів та переваги застосування моделі вибору цілей за допомогою матриці відстаней, а також використання принципів мережі Гопфілда для швидкого досягнення стабільного режиму. Особливо цінним є представлений підхід до розподілу цілей та завдань між суброями дронів, що дозволяє уникати зіткнень і забезпечувати кооперативний рух у складних просторових умовах. Моделювання рою як розподіленої системи зі структурованими етапами управління – до інциденту, під час критичної ситуації та після її завершення – дозволяє глибше зрозуміти логіку функціонування гетерогенної мережі та вимоги до її архітектури. Окремо наголошується на важливості симуляції для оптимізації поведінки рою, що є особливо значущим у випадку складних 3D-коридорів. Це підкреслює практичну цінність роботи та її придатність для подальшої реалізації в системах автоматизованих складів, логістичних центрів чи групового управління БПЛА.

Інформаційні джерела

1. 15-th International Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWISE–2019), Kunibiki Messe, Matsue, Japan, 2019. URL: <http://voyager.ce.fit.ac.jp/conf/hwise/2019/>
2. Zhuravska I. M., Musiyenko M. P. Mobile control system for heterogeneous movable network based on unmanned vehicles. Collection of Scientific Works of the Military Institute of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. 2017. Vol. 57. P. 30-40.
3. Мосов С. П., Хижняк В. В., Литовченко А. О., Ядченко Д. М. Класифікація, функції та завдання безпілотної авіації у сфері цивільного захисту України. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 2 (12). С. 54-68. DOI: 10.33269/nvcz.2021.2.54-68.
4. Троянський О. В., Кандєєв П. О. Класифікація безпілотних літальних апаратів за типами і технологіями керування. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. 4(3). С. 89–100. DOI: 10.46299/j.isjea.20250403.08.
5. Szabolcsi R. UAV operator training – beyond minimum standards. *Scientific research and education in the air force – AFASES 2016*. June 2016. P. 193-198. DOI: 10.19062/2247-3173.2016.18.1.25.
6. NPR 7900.3D – Chapter5. Unmanned Aircraft Systems Operations : NASA Procedural Requirements. May 01, 2017–February 17, 2026. URL: https://nodis3.gsfc.nasa.gov/npg_img/N_PR_7900_003D/N_PR_7900_003D_Chapter5.pdf (Last accessed: 22.11.2025).
7. Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and 2019/945). Rev. July 2024. 468 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone> (Last accessed: 22.11.2025).
8. Kumar J., Himanshu H. K., Kandath H., Agrawal P. Vision based UAV Navigation through Narrow Passages, 2023 (arXiv preprint arXiv:2303.15803). DOI: 10.48550/arXiv.2303.15803
9. Худов Г. В., Хижняк І. А., Ярмолюк В. М., Марченко В. П. Методика обробки зображень з бортових систем спостереження в інтересах подальшої класифікації об'єктів

інтересу. *Системи обробки інформації*. 2022. Вип. 2 (169). С. 87-95. DOI: 10.30748/soi.2022.169.10.

10. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Метод динамічного цілерозподілу неоднорідного рою ударних безпілотних літальних апаратів на основі ітераційних процедур «задачі про призначення». *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2025. № 2 (53). С. 138-149. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-138-149.

11. Qian W., et al. Control-Oriented Real-Time Trajectory Planning for Heterogeneous UAV Formations. *Drones*, 2025. DOI: 10.3390/drones9020078

12. Armeniakos H.K., et al. A stochastic geometry-based performance analysis of UAV-assisted aerial corridor networks. *Frontiers in Communications and Networks*, 2024. DOI: 10.3389/frcmn.2024.1337697

13. Geng L., Li H., Givigi S., Adams B. SwarmUpdate: Hierarchical software updates and deep learning model patching for heterogeneous UAV Swarms : preprint. arXiv: 2503: 13784v1. Publ. 18 March, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2503.13784.

14. Duan, P., Chen D. Distributed cooperative path planning for multi-UAV in complex environments. *Drones*. 2025. Vol. 9 (1), no. 38. DOI: 10.3390/drones9010038.

15. Zhuravska I., Musiyenko M. Heterogeneous computer networks of critical application: Creation and functioning of networks based on UAVs' swarms and flocks : monograph. LAMBERT Academic Publishing, 2018. 367 p. URL: <https://www.amazon.com/Heterogeneous-computer-networks-critical-application/dp/6139863570> (Last accessed: 21.11.2025).

16. Alami R., Fleury S., Herrb M., Ingrand F., Robert F. Multi robot cooperation in the MARTHA project : Report / Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS-CNRS). *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 1998. Vol. 5, no. 1. P. 36-47. DOI: 10.1109/100.667325.

17. Компанієць О. М., Ткачов А. М. Удосконалена модель оцінки очікуваної корисності БПЛА у ройовому цілерозподілі при динамічному розіграві бойових дій. *Системи обробки інформації*. 2024. Вип. 3, № 178. С. 42-47. DOI: 10.30748/soi.2024.178.05.

18. Hopfield J. J., Brody C. D. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) of the USA*. 2001. Vol. 98, No. 3. P. 1282-1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.

19. Подвійна система скиду із універсальною навіскою різноманітних вантажів для FPV коптерів. *Безпілотні та роботизовані рішення в повітрі, на воді та на землі* : вебсайт компанії «POLYDRONE». URL: <https://polydrone.com.ua/ua/p2087554220-podvijna-sistema-skidu.html?srsltid=AfmBOop6dkPW44UAdMSX-Gh8FuYApDx4-lizPDpyXKoYhZPB9qQMYzpJ> (дата звернення: 21.11.2005).

Zhuravska I., Tonkha O., Nechai I., Humeniuk T.

CONTROL OF A GROUP OF UAVS USING COMPUTER VISION IN A SPATIAL CORRIDOR BASED ON A HETEROGENEOUS NETWORK

The article considers the problem of controlling a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) or drones that perform tasks in spatial corridors with a high rate of change in environmental characteristics. The work focuses on the heterogeneity of drones, their different design, functions, computing capabilities and types of communication channels that form a complex dynamic heterogeneous network. International classifications of UAVs are systematized and the relevance of the study is determined in the context of increasing scale and complexity of operational scenarios. Considerable attention is paid to the concept of fast-dynamic processes that determine the requirements for information processing algorithms and decision-making in group systems. The paper analyzes modern research in the field of computer vision, decentralized coordination and network solutions for drone swarms. It is shown that the integration of algorithms, modeling, simulation and visual methods allows to significantly increase the accuracy of navigation and the ability to detect obstacles in confined space (narrow corridors) during group interaction. The authors propose a model of target selection and task distribution between UAV subswarms, based on distance matrix analysis, as well as the use of algorithms such as the Hopfield neural network to quickly achieve a stable group interaction mode. The importance of simulating UAV movement in 3D space for studying swarm behavior and optimizing collision avoidance is emphasized. The proposed approach allows for effective modeling of swarm element interaction in conditions of

limited information and dynamic environment. The results of the work can be used in logistics systems, automated warehouses, critical infrastructures, and for designing UAV swarm control systems.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), drone subswarm, heterogeneous network, distributed system, routing, confined space, safety navigation, computer vision, image processing, , automatic control system, Hopfield neural network, information and computer system, multi-level video image analysis.

Дата першого надходження
статті до видання
14.10.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
11.12.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.