

УДК: 621.296.4

DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-156-172

РОМАНЮК Валерій Антонович,

доктор технічних наук, професор,
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв Крут, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-6218-2327>

ГРИМУД Андрій Геннадійович,

доктор філософії,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0003-4012-5185>

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ (РОЄМ) БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В умовах динамічної тактичної (оперативної) обстановки та активної протидії з боку противника ефективне функціонування системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів неможливе без наявності адаптивної та стійкої системи управління. Процес управління такою системою передбачає координацію дій безпілотних літальних апаратів, підтримання мережевої топології, забезпечення якості зв'язку та реагування на зміну умов. Об'єктом дослідження є процес управління функціонуванням групи (рою) безпілотних літальних апаратів, побудованої на основі взаємодії сукупності автономних повітряних платформ, що забезпечують колективне виконання поставлених завдань. **Метою статті** є розроблення методологічних основ синтезу системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів для забезпечення виконання тактичних, оперативних завдань Силами оборони України.

Методи дослідження. У процесі підготовки статті використано сукупність теоретичних і прикладних методів дослідження, зокрема, аналізу, синтезу, узагальнення та системного підходу. Метод аналізу було застосовано для вивчення структури, функціональних особливостей та архітектури систем управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів. Метод синтезу дав змогу побудувати узагальнену модель синтезу системи управління, визначити її основні функції, завдання, принципи та архітектурні варіанти. Системний підхід забезпечив комплексний розгляд взаємодії функціональних підсистем – комунікаційної, навігаційної, діагностичної, виконавчої – в умовах змінного середовища та впливу противника. Крім того, у дослідженні враховано сучасні технологічні рішення, зокрема, використання децентралізованих алгоритмів, штучного інтелекту та самоорганізованих мереж, які забезпечують живучість, масштабованість та адаптивність.

Отримані результати дослідження. У статті розглядаються основні аспекти синтезу та функціонування систем управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів. Обговорюється актуальність теми, аналізуються останні досягнення в зазначеній області, а також докладно описується послідовність етапів синтезу: аналіз вихідних даних, принципи побудови системи управління, її архітектура, основні функції, моделі та алгоритми управління. Наведено класифікацію завдань управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів, що охоплює їх поділ за етапами, об'єктами впливу, метою, функціональним призначенням, архітектурою та математичною постановкою. Розроблено методологічні основи синтезу системи управління групами (роями) безпілотних літальних апаратів з урахуванням архітектур моделей взаємодії. Особлива увага надається децентралізованим моделям взаємодії та координації дій безпілотних літальних апаратів. Запропоновано підхід, що комплексно відображає структуру процесу управління роєм безпілотних літальних апаратів. Визначені перспективи розвитку та застосування таких систем.

Елементи наукової новизни. У роботі вперше розроблено методологічні засади синтезу системи управління групами (роями) безпілотних літальних апаратів, що поєднують можливості централізованих, децентралізованих та гібридних архітектур. Такий підхід дає змогу системно відобразити структуру процесу управління та забезпечити цілеспрямований вибір відповідних моделей і методів на кожному рівні функціонування системи.

Теоретична й практична значущість викладеного у статті. У статті визначено методологічні засади синтезу системи управління, сформованими групою (роєм) безпілотних літальних апаратів, що дає змогу створити ефективну інтелектуальну систему управління військового призначення. Виокремлено основні етапи синтезу, сформульовано цілі, функції та завдання управління, що забезпечує структуровану основу для побудови адаптивних і масштабованих систем управління в умовах бойових дій. Практичне значення одержаних результатів зводиться до можливостей створення, на основі запропонованих методологічних підходів, алгоритмів управління для їх впровадження у програмно-апаратні комплекси для організації роботи роїв безпілотних літальних апаратів, що дасть змогу підвищити їхню стійкість, масштабованість та ефективність у військових операціях на всіх рівнях. Перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція алгоритмів штучного інтелекту в базисагентну систему управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів з метою розширення рівня автономності та адаптивності.

Ключові слова: група (рій), безпілотний літальний апарат, система управління роєм, автономне управління, координація.

Вступ

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА) призвів до потреби реалізації концепції їх групового (роевого) застосування [1]. БпЛА, що об'єднані в групи (рої), передбачають скоординовані дії апаратів, які взаємодіють між собою та оточуючим середовищем. Кожний апарат виконує прості базові правила, але сукупно діють як складний організм, здатний приймати рішення. Це відкриває нові можливості для виконання складних і масштабних завдань, які недоступні поодиноким БпЛА. Однак ефективне управління групою БпЛА пов'язане з низкою проблем. Серед яких можна виділити:

складність групового (роевого) польоту та координації дій великої кількості БпЛА;

забезпечення надійності та безпеки зв'язку;

потреба розроблення ефективних методів (алгоритмів) управління, що дають змогу групі (рою) функціонувати як єдине ціле.

Тому синтез систем управління (далі – СУ) групами (роями) БпЛА є актуальною науковою проблемою. Об'єктом розгляду статті є процес управління функціонуванням повітряної комунікаційної мережі, побудованої на основі взаємодії сукупності автономних повітряних платформ зв'язку, побудованих на БпЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сьогодні активно проводяться дослідження в галузі управління групами (роями) БпЛА, які пропонують різні підходи до вирішення проблем координації та автономності. У сучасних виданнях можна виділити декілька основних напрямів стосовно архітектури систем управління, моделей управління [2–5]. *Централізовані СУ.* Припускають наявність єдиного центру (насамперед, наземного центру управління (далі – НЦУ)), який збирає інформацію з усіх БпЛА, приймає рішення та надсилає команди управління. Приклади таких систем розглядаються в роботах, де досліджуються методи оптимізації глобальних траєкторій та розподілу ресурсів. Однак, їх масштабованість обмежена, а вихід з ладу єдиного центру знижує живучість [2–4]. *Децентралізовані (розподілені) СУ.* Кожен БпЛА в групі (рою) має певний ступінь автономності та взаємодіє тільки зі своїми найближчими сусідами. Рішення приймаються на основі локальної інформації, що забезпечує високу відмовостійкість і масштабованість. Прикладами можуть служити дослідження алгоритмів консенсусу [4] або поведінкових моделей, таких як flocking [5]. *Гібридні підходи.* Поєднують переваги централізованого та децентралізованого управління, використовуючи центр управління для високорівневого планування та децентралізовані алгоритми для локальної координації й уникнення колізій [4].

У монографії [3] розглянуто завдання планування та контролю групового та ройового польоту БпЛА, здійснено аналіз існуючих тактик використання ройових формацій, проаналізовано підходи та методології ройового управління, що використовуються в Україні.

У науковій праці [4] проаналізовано завдання підвищення ефективності функціонування та подовження часу життя БпЛА, розглянуто особливості забезпечення стабільності радіозв'язку, поліпшення захищеності даних, що передаються. Значна увага в дослідженнях надається застосуванню технологій штучного інтелекту (далі – ШІ), особливо глибокому навчанню з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning), для навчання БпЛА автономній поведінці та взаємодії у складних і динамічних середовищах [7–10]. Також досліджуються методи оптимізації траєкторій для групового польоту з урахуванням динамічних перешкод і розподілу завдань [11–16]. В [17–20] розглядається розроблення ефективних протоколів зв'язку для роїв БпЛА та забезпечення їх кібербезпеки [21]. Однак, у доступних джерелах системні роботи, що відображають комплексність й етапність рішення проблеми синтезу СУ, відсутні.

Отже, **метою статті** є розроблення методологічних основ синтезу системи управління групою (роем) безпілотних літальних апаратів для забезпечення виконання тактичних, оперативних завдань Силами Оборони України.

Виклад основного матеріалу дослідження

Управління групою БпЛА є складним завданням, яке має низку особливостей, зокрема це:

неоднорідність БпЛА за функціями, параметрами та наявними ресурсами;

необхідність комунікації між БпЛА та (або) з центром управління;

потреба вирішення проблеми стосовно уникнення колізій (запобігання зіткнень між БпЛА з іншими об'єктами та перешкодами);

динамічний та антагоністичний характер зовнішнього середовища (зміна погодних умов, переміщення об'єктів, поява нових технологічних впливів противника тощо);

оснащення БпЛА певним обладнанням (системою навігації та позиціонування, множиною датчиків для сприйняття навколишнього середовища та виконання завдань);

можливість зміни завдань, які виконуються групою (роем) БпЛА під час польоту;

наявність правових і нормативних обмежень тощо.

Узагальнена схема синтезу СУ групою БпЛА запропонована на (рис. 1). Розглянемо детально кожен з етапів синтезу.

На першому етапі проводиться аналіз вхідних даних. Вихідними даними для синтезу системи управління групою БпЛА є:

а) множина некерованих параметрів $E = \{E_n, n=1 \dots N\}$:

стан зовнішнього середовища (місцевість та виявлені локальні перешкоди, погодні умови);

стан, положення противника та його можливий вплив тощо;

інформація про завдання бойових підрозділів і підрозділів безпілотних систем;

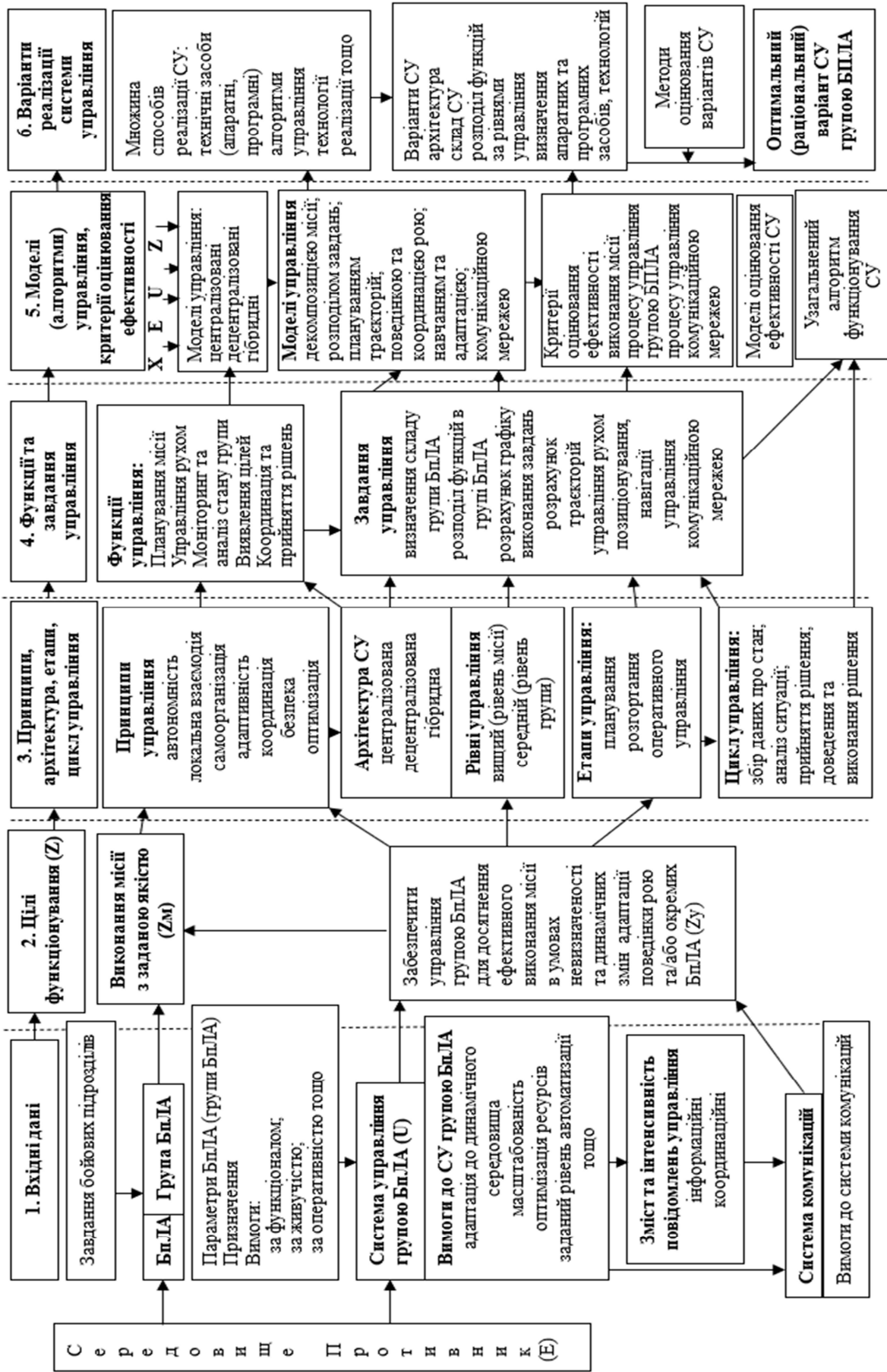


Рисунок 1 – Схема синтезу системи управління групою безпілотних літальних апаратів

б) множина відомих (керованих) параметрів $X = \{X_j\}, j=1 \dots J$:

функціонал (технічні характеристики) конкретного БпЛА та групи (рою) БпЛА;

вимоги до системи управління групою БпЛА (за оперативністю, точністю, рівнем безпеки, оптимізацією витрат ресурсів, адаптивністю функціонування, рівнем автоматизації процесів управління тощо).

параметри системи комунікацій (тип каналів: радіо, оптоволоконний, безпроводовий оптичний), обсяг навантаження, топологія мережі, протоколи інформаційного обміну) та вимоги до неї (за алгоритмами управління, продуктивністю, безпекою тощо).

На другому етапі синтезу визначаються:

цілі функціонування групи БпЛА (Z_m) та показники виконання завдання (місії);

цілі управління групою БпЛА (Z_y) та показники якості процесу управління групою БпЛА.

На третьому етапі синтезу визначаються принципи та етапи управління, архітектура СУ. Ефективне управління групою БпЛА ґрунтується на низці головних принципів, які визначають її здатність успішно виконувати завдання (місії) в динамічних і невизначених умовах:

Принцип децентралізації та автономності – максимальне делегування функцій з обробки інформації й прийняття рішень окремим БпЛА. Кожен БпЛА має власну СУ (свій «інтелект») і здатний взаємодіяти локально й автономно виконувати завдання. Центр управління (якщо такий наявний) використовується лише для високорівневого планування та моніторингу, але не для мікроуправління кожним БпЛА. Перевагами такого принципу є підвищена відмовостійкість, краща масштабованість, швидке реагування на локальні зміни, зменшення залежності від надійності каналу зв'язку з центром управління.

Принцип координації – здатність окремих БпЛА координувати свої дії для досягнення загальної мети місії, уникаючи при цьому конфліктів та зіткнень. Забезпечує цілісність групи (рою) як єдиної системи, дає змогу виконувати колективні завдання (наприклад, моніторинг великої території, формування повітряної мережі зв'язку).

Принцип локальної взаємодії – основна частина координації та обміну інформацією між БпЛА відбувається лише з найближчими сусідами, а не з усіма членами рою. Для його реалізації кожен БпЛА має обмежену зону комунікацій між БпЛА які належать групі (рою). Глобальна злагоджена поведінка групи (рою) виникає з простих правил локальної взаємодії. Перевагою є те, що значно зменшується навантаження на канали зв'язку, спрощені алгоритми координації, підвищена збільшена масштабованість і адаптивність до динамічних змін топології рою. Основним недоліком слід вважати те, що локальна взаємодія не гарантує глобальної оптимізації.

Принцип самоорганізації та самовідновлення – здатність групи (рою) БпЛА продовжувати функціонувати та виконувати місію навіть у разі відмов одного або кількох БпЛА, втрати зв'язку з частиною рою чи за наявності невизначеностей і

зовнішніх перешкод. Реалізується завдяки використанню алгоритмів децентралізованого прийняття рішень, перерозподілу завдань, перепланування траєкторій, переналаштування комунікаційної мережі, зміни в структурі групи (рою), використання надлишкових ресурсів, використання алгоритмів машинного навчання тощо.

Принцип адаптивності – здатність СУ змінювати стратегії (моделі) поведінки та параметри групи (рою) у відповідь на зміни, які не передбачені на етапі планування. В умовах використання групи (рою) БпЛА адаптивність може проявлятися на кількох рівнях:

індивідуальному (рівень БпЛА) – адаптація бортових диспетчерів польоту до змін у динаміці окремого БпЛА (наприклад, через пошкодження, зміну ваги, пориви вітру).

груповому (рівень рою) – адаптація колективної поведінки, формування, призначення завдань або стратегії координації у відповідь на зміни у зовнішньому середовищі (невідомі перешкоди, поява нових цілей) або внутрішньому стані групи (рою) (відмова агентів, втрата комунікації).

Реалізація досягається завдяки використанню адаптивних контролерів, алгоритмів динамічного перепланування, машинного навчання (наприклад, навчання з підкріпленням), які дають змогу групі (рою) «навчатися» та оптимізувати свою поведінку. Перевагами є ефективна робота в невизначеному та динамічному середовищі, можливість виконувати складні місії без попереднього повного знання всіх її умов.

Принцип ієрархічності управління – поділ функцій управління на ієрархічні рівні (стратегічний (верхній), оперативний (середній), тактичний (виконавчий (нижній))), де кожен рівень використовує свої цілі і методи (алгоритми) управління. Реалізувати можна так. НЦУ або БпЛА-лідер (Swarm Leader) визначає завдання вищого рівня, середній рівень (рівень групи (рою) БпЛА) займається координацією та груповим плануванням, а нижній рівень (окремий БпЛА) відповідає за виконання окремого завдання та локальну взаємодію. Перевагами є спрощення реалізації СУ, чіткий розподіл функцій та завдань управління, можливість використовувати різні алгоритми управління на кожному рівні.

Принцип масштабованості – можливість ефективного управління групою (роєм) з різною кількістю БпЛА без значного збільшення складності управління або зниження продуктивності. Дає змогу адаптувати розмір групи (рою) під конкретне завдання, забезпечуючи економічну ефективність і гнучкість. Реалізується використанням децентралізованих алгоритмів, де складність взаємодії лінійно зростає зі збільшенням кількості БпЛА.

Принцип оптимальності – оптимальне використання ресурсів групи (рою) (часу, енергії, обчислювальних ресурсів, пропускну здатності каналів зв'язку) для досягнення поставлених цілей. Це дає змогу збільшувати тривалість місії, знижувати експлуатаційні витрати, максимізувати корисність групи (рою). Реалізовувати доцільно завдяки оптимізації траєкторій БпЛА та розподіленню завдань,

використанню ефективних протоколів зв'язку тощо.

Принцип безпеки – мінімізація ризиків зіткнення між БпЛА, із зовнішніми перешкодами та забезпечення безпеки комунікацій. Можливими способами реалізації слід вважати розроблення (удосконалення) алгоритмів уникнення зіткнень, використання обмеження зон польоту та протоколів надзвичайних ситуацій, шифрування передачі даних, впровадження підсистеми кібербезпеки тощо.

Узагальнюючи зазначимо, що наведені *принципи* взаємопов'язані й часто підсилюють один одного, вони визначають вибір архітектурних рішень, функції та методи (алгоритми) управління. В свою чергу, *архітектура системи управління* групи (роєм) БпЛА являє собою багаторівневу ієрархічну структуру, що забезпечує ефективний розподіл завдань і координацію між центром управління (НЦУ, БпЛА-лідером), групою (підгрупою) і кожним окремим БпЛА. Вона може бути реалізована в централізованій, децентралізованій або гібридній формі. Визначимо ієрархію рівнів архітектури системи управління роєм БпЛА та їх функції. *Верхній рівень (місії) СУ* (рівень НЦУ або БпЛА-лідер) виконує функції:

1. Загальна постановка завдання. Визначення цілей та обмеження місії високого рівня (наприклад, «моніторинг зони Х», «доставка вантажу в точку Y», «проведення пошуково-рятувальної операції в зоні Z»).

2. Планування та моделювання місій. Створення сценаріїв, визначення сфер інтересів, попереднє призначення завдань.

3. Моніторинг стану групи (рою). Відображення загального ходу виконання місії, місцеположення БпЛА, їх стан, основні показники ефективності.

4. Взаємодія з оператором. Використання інтуїтивно зрозумілого графічного інтерфейсу користувача для введення команд, перегляду телеметрії, зміни планів під час польоту.

5. Прийняття рішень на високому рівні. Реалізація можливості втручання людини-оператора під час критичних ситуацій або прийняття стратегічних рішень.

Компоненти рівня являє собою робоче місце оператора НЦУ (БпЛА-лідер) та комп'ютерне обладнання з відповідним програмним забезпеченням, який в собі містить модуль планування та візуалізації місії. Програмне забезпечення дає змогу створення та відображення планів, карт, 3D моделей. Людино-машинний інтерфейс наведений як панелі керування, джойстики, сенсорні екрани.

Середній рівень (рівень рою) виконує функції:

1. Декомпозиція завдання: розбиття загального завдання місії на завдання, які можуть виконувати окремі БпЛА або їх підгрупи.

2. Розподіл завдань за конкретним БпЛА згідно їх можливостей, місцезнаходження та поточного стану.

3. Координація та формування (підтримка) заданого строю групи (рою) (лінія, колона, рій, коло), забезпечення синхронізації рухів та дій БпЛА.

4. Планування групової траєкторії: оптимізація траєкторії для всього групи (рою), уникаючи зіткнень

між власними БпЛА та зовнішніми перешкодами.

5. Управління комунікаційною мережею: управління топологією мережі БпЛА, маршрутизація даних, для забезпечення заданої якості обміну даними в середині рою і з НЦУ.

6. Моніторинг та діагностика рою: збір й узагальнення даних з окремих БпЛА для оцінки загального стану рою та виявлення проблем.

7. Відновлення та переналаштування: прийняття рішень про перерозподіл завдань або зміну строю у разі відмови одного або кількох БпЛА.

Компонентами *середнього рівня системи управління БпЛА* є: центральний координатор (у централізованій / гібридній архітектурі), потужний обчислювальний вузол (може бути на НЦУ або на БпЛА-лідері); модуль розподіленого консенсусу / координації (у децентралізованій / гібридній архітектурі) – алгоритми, що працюють на кожному БпЛА для забезпечення колективного прийняття рішень; модуль планування групової навігації: алгоритми генерації траєкторій, що враховують динаміку всієї групи (рою); підсистема комунікацій: радіомодулі, антени, протоколи передачі даних мереж типу FANET – Flying Ad-hoc Network) [17–19].

Нижній рівень (рівень системи управління БпЛА) виконує функції:

1. Автономне управління польотом: стабілізація, підтримання заданої висоти, швидкості, напрямку.

2. Навігація та локалізація: визначення власного місця розташування (GPS/ГЛОНАСС, інерційні системи, візуальна одометрія, SLAM (simultaneous localization and mapping) тощо).

3. Уникнення перешкод у близькому просторі (наприклад, за допомогою бортових датчиків: камери, тепловізори, радари, лідари тощо).

4. Збір і первинна обробка даних із бортових датчиків.

5. Виконання індивідуальних завдань, призначених рівнем рою.

6. Взаємодія з сусідніми БпЛА (обмін інформацією про власний стан, цільові функції, наміри та сенсорні дані) для координації дій.

7. Реалізація дій у надзвичайних ситуаціях (автономне повернення на базу, безпечна посадка у разі втрати зв'язку або розряду батареї тощо).

Компонентами *нижнього рівня системи управління БпЛА* є: бортовий комп'ютер (пальотний контролер); навігаційні датчики (GPS приймач, блок інерційного вимірювання (IMU), барометр, магнітометр тощо); датчики виявлення перешкод (лідари, радари, ультразвукові датчики, камери тощо); модуль зв'язку (для обміну даними з НЦУ та іншими БпЛА); виконавчі механізми (двигуни, гвинти, сервоприводи); батарея/блок живлення.

Отже, *взаємозв'язок верхнього, середнього і нижнього рівнів* відбувається тоді, коли кожен рівень архітектури взаємодіє з сусідніми, передаючи команди вниз за ієрархією і звіти / статуси вгору. Це забезпечує гнучкість й адаптивність системи, даючи змогу як оператору високого рівня, так і окремим БпЛА приймати рішення на основі інформації та

повноважень свого рівня.

На четвертому етапі синтезу визначаються функції та завдання управління. Система управління групою (роєм) БпЛА виконує такі основні функції:

планування (перепланування) місії – декомпозиція місії на завдання, визначення складу групи БпЛА, розподіл індивідуальних (часткових) завдань між БпЛА (кластерами), визначення оптимальних траєкторій руху групи та кожного БпЛА;

управління польотом групи (рою) БпЛА – узгодження управління кожним літальним апаратом для організації руху за встановленою конфігурацією групи (рою) за заданим маршрутом для досягнення мети місії;

виявлення та відстеження цілей – обробка інформації від датчиків (сенсорів) для виявлення, ідентифікації та відстеження рухомих об'єктів;

уникнення колізій – використання алгоритмів запобігання зіткнень між БпЛА в групі (рої) та із

зовнішніми перешкодами.

координація виконання завдань місії у часі та просторі – СУ має забезпечити: визначений рівень оперативності досягнення мети місії, живучості групи (рою) БпЛА (досягається завдяки перерозподілу завдань місії та реконфігурацією групи (рою)), масштабованості виконуваних завдань, автоматизації під час управління групою (роєм), адаптацію до умов динамічного середовища.

Проаналізувавши основні функції системи управління групою БпЛА виникає необхідність уточнення розуміння визначення *синтезу системи управління групою БпЛА*. Він являє собою складне наукове та практичне завдання й вимагає комплексного підходу. Тому його краще проводити за функціональними підсистемами, основними з яких є: управління польотом, комунікаційна, навігації та орієнтування, збору даних про стан групи, прийняття рішень, виконання завдань (рис. 2).

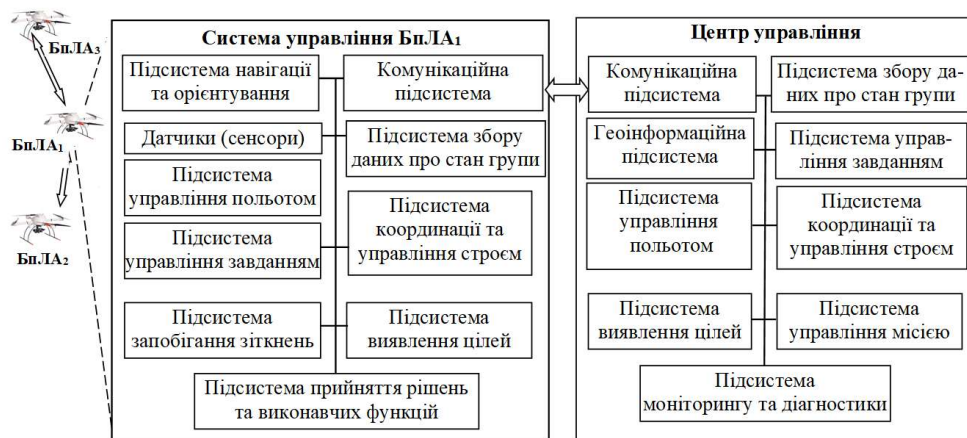


Рисунок 2 – Функціональна модель системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів

Кожна з підсистем функціональної моделі, наведених на рис. 2, реалізує відповідні моделі, методи управління та виконує свої цільові функції [5]. Далі розглянемо окремі підсистеми і дамо їх коротку характеристику.

Підсистема управління польотом розраховує траєкторії польоту як групи БпЛА, так і кожного БпЛА окремо, забезпечує сам процес польоту завдяки заздалегідь запрограмованого польотного завдання.

Підсистема моніторингу та діагностики забезпечує обізнаність про стан всієї групи. Мета – збір, агрегація та аналіз даних про стан кожного БпЛА та групи в цілому для моніторингу виконання місії, виявлення несправностей та вжиття коригувальних заходів. Основні функції:

збір телеметрії – отримання даних про стан кожного БпЛА (рівень заряду батареї, стан двигунів, показання датчиків, положення у просторі, швидкість руху);

діагностика несправностей – виявлення та локалізація відмов окремих БпЛА або підсистем;

оцінювання стану виконання місії – моніторинг основних показників виконання місії;

візуалізація даних – зручне надання оператору

інформації про поточний стан групи (рою), карт, планів та сповіщення;

ведення журналу подій для подальшого аналізу.

Підсистема прийняття рішень та виконавчих функцій (на борту БпЛА) – дає змогу кожному БпЛА автономно приймати локальні рішення та виконувати команди, що надходять від підсистем вищого рівня.

Основні функції:

трансформація завдань вищого та середнього рівня на завдання для БпЛА та їх виконання (наприклад, завдання «політ у точку X», «область сканування Y» перетворюється на конкретну траєкторію та команди керування двигунами, гвинтами, сервоприводами);

обробка сенсорних даних – фільтрація, інтерпретація та об'єднання даних з бортових датчиків для формування локальної картини;

локальне планування та навігація – самостійне прокладання коротких ділянок маршруту польоту, підбір оптимальних маршрутів для уникнення місцевих перешкод.

Алгоритми, що реалізують зазначені функції: Proportional Integral Derivative (PID) контролери, алгоритми уникнення перешкод, кінцеві автомати для контролю поведінки групи (рою) БпЛА, бортові

модулі штучного інтелекту.

Комунікаційна підсистема має забезпечити надійну, ефективну та безпечну (шифрування даних, аутентифікація, захист від атак та придушення) передачу даних між БпЛА у рою, а також між БпЛА та НЦУ. Реалізується завдяки розгортанню повітряної комунікаційної мережі, що може бути побудована за принципом самоорганізації [18].

Підсистема збору даних про стан групи здійснює обмін службовими повідомленнями між НЦУ – БпЛА, БпЛА–БпЛА, що містять інформацію про параметри стану певного БпЛА, та підтримує відповідну базу даних стану групи.

Підсистема координації та управління групою (роєм) забезпечує злагоджену поведінку групи в цілому. Метою є підтримання заданої просторової фігури рою (строю) та синхронізація рухів БпЛА для колективного виконання поставлених завдань.

Основні функції:

утримання (реконфігурація) рою – автоматично коригує положення кожного БпЛА щодо інших для утримання їх у строю та щільності рою залежно від завдань місії або умов навколишнього середовища;

синхронізація дій – забезпечення одночасного або послідовного виконання певних дій БпЛА;

уникнення колізій (зіткнень як між БпЛА, так і з зовнішніми перешкодами).

Алгоритми, що реалізують зазначені функції: правила Бойда, потенційні польові методи, алгоритми консенсусу, модель прогнозного керування (наприклад, Velocity Obstacles), геометричні алгоритми.

Підсистема навігації та позиціонування – відповідає за точне визначення положення кожного БпЛА та всього рою у просторі. Мета – надання точних даних про місцеположення, орієнтацію та швидкість кожного БпЛА для безпечного, ефективного виконання місії та координації групи. Алгоритми, що забезпечують роботу зазначеної підсистеми: фільтри Калмана (Extended Kalman Filter, Unscented Kalman Filter), Particle Filter, алгоритми SLAM (FastSLAM, ORB-SLAM) тощо. *Датчики (сенсори)* розрізняють за двома видами:

внутрішні – діагностують стан БпЛА й інформують про його динамічні параметри (швидкість, координати та орієнтацію у просторі);

зовнішні – визначають положення перешкод і параметри руху інших об'єктів.

Підсистема управління місією (завданням) призначена для аналізу стану виконання місії (завдань), розподілу завдань за функціональним призначенням кожного БпЛА та корегування їх виконання з урахуванням наявних ресурсів та обстановки. Ця підсистема є «мозком» групи (рою) на стратегічному (вищому) рівні.

Основні функції:

визначення завдань місії, отримання вхідних даних від оператора (цілі, обмеження, області інтересів);

декомпозиція завдань на елементарні, які можуть виконувати окремі (підгрупи, кластери) БпЛА;

групове планування – створення узагальнених планів для всієї групи (рою), зокрема, оптимальні маршрути та графіки виконання завдань;

розподіл завдань – призначення конкретних завдань конкретним БпЛА (підгрупам, кластерам) на основі їх можливостей, ресурсів та поточного місцеположення (використовуються алгоритми аукціону, консенсусу або оптимізації);

динамічне перепланування – автоматична корекція або повна перебудова плану місії у разі непередбачених ситуацій (вихід з ладу БпЛА, виявлення нових перешкод, зміна цілей тощо).

Алгоритми, що забезпечують роботу зазначеної підсистеми: алгоритми оптимізації (лінійне, цілочисельне програмування), протоколи аукціонів, алгоритми на основі графічних моделей, методи штучного інтелекту (наприклад, планування на основі навчання з підкріпленням).

Геоінформаційна підсистема (ГИС)

використовується НЦУ для побудови траєкторій руху БпЛА з урахуванням рельєфу місцевості, міської забудови та перешкод.

Визначені функціональні підсистеми тісно взаємодіють між собою, утворюючи складну, але злагоджену систему управління, здатну реалізувати весь потенціал групового використання БпЛА. Кожна функція управління поділяється на множину завдань управління групою БпЛА, класифікація яких наведена на рис. 3.

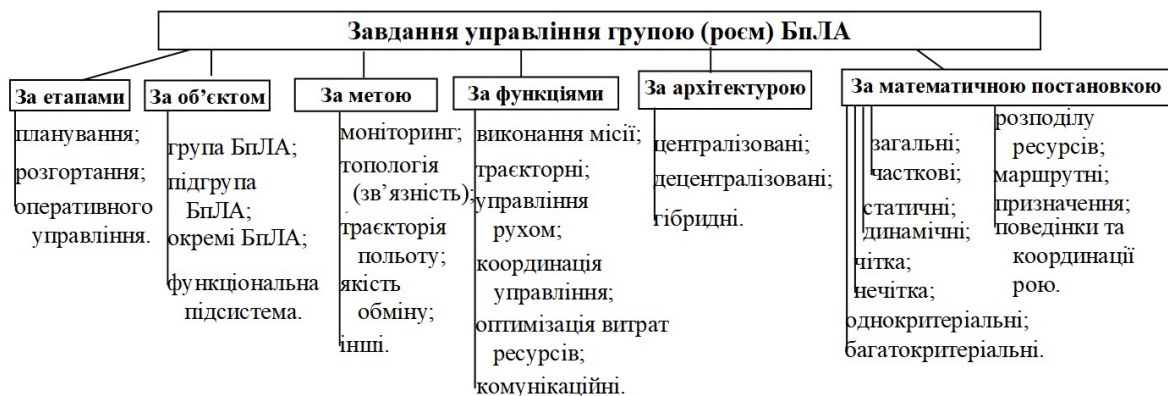


Рисунок 3 – Класифікація завдань управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів

За етапами завдання управління поділяться на *планування, розгортання (відновлення, нарощення) і оперативного управління* [18]. Етап *планування* реалізується посадовими особами НЦУ. Це початковий і стратегічний етап, на якому визначаються загальні цілі і готується початковий план дій групи (рою). Водночас залежно від тривалості циклу управління передбачається довгострокове і оперативне планування. Планування застосування групи (рою) БпЛА здійснюється централізовано НЦУ. *Змістом планування* (виходячи із прогнозованої обстановки та наявних ресурсів) є:

постановка загальних цілей – узагальнене планування застосування групи БпЛА в цілому та окреме планування кожного БпЛА;

аналіз вимог органів (посадових осіб) військового управління щодо завдань підрозділам безпілотних систем;

аналіз параметрів місії – карти, рельєф, погодні умови, заборонені для польотів зони, відомі перешкоди, визначення цілей місії та їх пріоритети тощо;

визначення оптимальної кількості типів і кількості БпЛА для досягнення визначених цілей.

Планування місії складається з таких управлінських функцій:

декомпозиція завдань – розбиття загальної місії на керовані завдання, які можна розподілити між БпЛА;

попередній розподіл ресурсів і завдань – визначення потрібної кількості БпЛА, їх типів, формування підгруп і первинний розподіл ролей та часткових завдань;

визначення місць запуску БпЛА, підзарядки, повернення (посадки) й траєкторії їх руху для реалізації певної мети місії;

розподіл ресурсів групи БпЛА за завданнями, вибір конкретних параметрів і режимів роботи БпЛА тощо;

планування траєкторії польоту групи (підгрупи) окремо на етапах розгортання групи (рою) (складання графіка розгортання) та оперативного управління (побудова траєкторії польоту БпЛА);

перевірка розробленого плану в середовищі моделювання для виявлення потенційних проблем і його оптимізація.

На етапі *розгортання* виконуються рішення, які прийняті на етапі *планування*:

підготовка БпЛА до польоту – перевірка систем, завантаження програмного забезпечення та початкових параметрів місії;

переміщення БпЛА до місць (районів) запуску;

запуск визначеної кількості БпЛА (індивідуальний або синхронний зліт БпЛА);

ініціалізація мережі зв'язку між БпЛА та НЦУ, перевірка стану каналів зв'язку, формування заданої топології комунікаційної повітряної мережі [17–19];

формування початкової строю (просторової фігури) рою до початку основної частини місії;

управління траєкторією польоту БпЛА у задані райони виконання завдань.

Водночас розгортання групи (рою) може виконуватися й на етапі оперативного управління при

значних змінах завдань місії або умов середовища. Контроль за етапом розгортання групи (рою) здійснюється з НЦУ.

На етапі *оперативного управління* за прийнятими критеріями ефективності СУ постійно оцінює стан окремого БпЛА, групи (кластера) і приймає рішення (відповідно до плану та реальної обстановки) з утримання (оптимізації) показників ефективності функціонування групи БпЛА на відповідному рівні. Цикл оперативного управління здійснюється центром управління (НЦУ або БпЛА-лідером) та передбачає послідовність виконання етапів:

1. Збору даних про параметри стану кожного БпЛА, групи (кластера). Система управління кожного БпЛА для оцінювання свого поточного стану та виявлення відхилень від заданих параметрів безперервно збирає дані:

від власних датчиків (швидкість польоту, кути орієнтації у просторі, рівень заряду акумулятора, стан двигуна тощо), параметри навколишнього середовища (виявлені локальні перешкоди, погодні умови, вплив РЕБ тощо);

з корисного навантаження, що забезпечують виконання завдання (виявлення цілей, виконання завдання на рівнях окремого БпЛА, кластеру, рою);

про стан сусідніх БпЛА (місцеположення, швидкість польоту, рівень заряду батареї, інформація про перешкоди, зміни в районі дії місії (операції) рою БпЛА;

від НЦУ або БпЛА-лідера (при наявності) – нові команди під час виконання місії, обумовлені змінами цілей високого рівня, пропозиціями щодо зміни стратегії поведінки групи (рою) БпЛА, попередження про загрози рою БпЛА тощо.

2. Аналізу стану БпЛА, групи (рою), комунікаційної мережі. СУ визначає пріоритети цілей управління та ступінь виконання місії (завдань), оцінює ефективність прийнятих рішень під час автономного польоту, необхідність формування управляючого впливу (наявність відхилень під час виконання завдання поставленим НПУ та виявлення необхідності в адаптації рою БпЛА для корегування поставленого завдання. Кожен БпЛА на етапі аналізу свого стану обробляє зібрані на *попередньому етапі* дані та оцінює чи потрібна адаптація, перерозподіл завдань по визначенню БпЛА-лідера тощо, і якщо так, то який саме вид адаптації. Для цього на нижньому рівні СУ кожного БпЛА поєднує власну інформацію, з сусідніх БпЛА від НЦУ для оцінювання поточного стану БпЛА та навколишнього середовища на основі:

оцінювання власних параметрів: (наприклад, поточна маса, аеродинамічні характеристики в умовах турбулентності);

оцінювання параметрів навколишнього середовища (швидкість і напрямок вітру, характеристики перешкод, що раптово виникають тощо);

виявлення аномалій/невизначеностей – виявлення значних розбіжностей між прогнозованою та спостережуваною поведінкою або між поточними та очікуваними умовами.

На *середньому рівні* СУ здійснює:

оцінювання стану групи (рою) (на своєму рівні або за

консенсусом);

оцінювання стану каналів зв'язку з сусідами та якості обслуговування маршрутів обміну.

оцінювання виконання завдання конкретним БпЛА, групою (кластером) та загальний прогрес місії в цілому групою (роєм);

виявлення відмов БпЛА (або втратили зв'язок);

оцінювання ефективності використання поточних правил/параметрів (наприклад, порушення конфігурації строю групи БпЛА через сильний вітер, є сигналом до адаптації);

приймає рішення про адаптацію – на підставі виявлених аномалій (невизначеностей, відмов або неефективності поточної стратегії).

3. Прийняття рішення групою (роєм) БпЛА – корегується завдання кожному БпЛА з урахуванням ресурсних обмежень та часу реалізації. СУ групою (роєм) БпЛА реалізує рішення за такими функціями:

координація руху БпЛА і поведінки групи в цілому з уникненням зіткнення між ними та із зовнішніми перешкодами;

управління строєм – автоматична корекція положення БпЛА для утримання заданої просторової фігури групи (рою);

виконання індивідуальних завдань БпЛА;

синхронізація дій БпЛА (послідовне виконання колективних завдань групою (кластером));

динамічний перерозподіл завдань між БпЛА у разі виявлення нових цілей або зміни умов;

оцінювання прогресу місії (порівняння поточного стану виконання завдань із запланованим);

діагностика та виявлення відмов БпЛА або збоїв у роботі систем управління рою.

Розрізняють такі види адаптації:

адаптація параметрів контролера – здійснюється у випадку виникнення проблем, пов'язаних з динамікою самого БпЛА (наприклад, змінилася маса БпЛА або опір вітру), алгоритм може перерахувати коефіцієнти контролю PID або параметри для прогнозованого керування Sliding Mode Control/Model Predictive Control (SMC/MPC). Може бути реалізовано завдяки використанню адаптивної еталонної моделі керування Model Reference Adaptive Control (MRAC) та регуляторів, що самоналаштовуються;

адаптація поведінкових правил – використовується поведінкова модель (наприклад, Voild), ваги для правил поділу, вирівнювання, згуртованості можуть бути змінені, щоб зробити рій більш щільним, або навпаки, більш розосередженим, залежно від завдання;

адаптація моделі середовища – передбачає оновлення карт перешкод, урахування динаміки сторонніх рухомих об'єктів.

зміни в структурі побудови рою – регулювання щільності просторової фігури рою (перехід до більш згуртованого або, навпаки, більш розосередженого);

перерозподіл завдань – якщо один або кілька БпЛА виходять з ладу, СУ перерозподіляє їх завдання між тими, що залишилися справними. Може бути реалізовано використанням протоколів аукціонів, алгоритми узгодження;

зміна маршруту/стратегії пошуку – якщо виявлено невідому велику перешкоду;

адаптація на основі навчання (Reinforcement Learning, RL) – якщо СУ використовує RL, то цей крок передбачає оновлення політики агенту на основі винагород/штрафів, отриманих за попередні дії. Агенти вчаться приймати кращі рішення в тому чи іншому середовищі.

У критичних ситуаціях можливе втручання оператора у процес управління. На етапі виконання рішення доводяться команди (рішення) та контролюється терміни їх виконання на основі постійного обміну інформацією між сусідніми БпЛА (для забезпечення децентралізованого прийняття рішень або НЦУ-БпЛА за централізованої архітектури). Якщо адаптація стосується всієї групи (наприклад, зміна просторової фігури строю), агенти мають досягти консенсусу щодо нової стратегії або параметрів за допомогою P2P-повідомлень. БпЛА-лідери можуть транслювати нові рішення на свої підгрупи (кластери).

Оперативне управління (на відміну від планування) може здійснюватися змішаним способом (централізовано/децентралізовано) у режимі реального часу, а за змістом можуть багаторазово повторюватися. За об'єктом управління (рис. 3) управляючий вплив може бути здійснено в масштабах всієї групи (підгрупи) БпЛА, функціональної підсистеми (наприклад, комунікаційної мережі), окремих БпЛА. Цільовою функцією управління роєм БпЛА доцільно вважати максимальну ймовірність виконання місії (наприклад максимум знищених цілей, максимальна площа моніторингу тощо).

За функціями завдання управління поділяються на:

завдання, що визначаються особливостями виконання місії (розподіл мети місії на завдання, визначення складу групи БпЛА та подальший розподіл часткових завдань між БпЛА (кластерами), планування графіка виконання завдань БпЛА, аналіз стану виконання місії тощо);

управління польотом (утримання на траєкторії польоту, формування та підтримка визначеної конфігурації рою БпЛА);

координації – визначення пріоритету цільових функцій управління та їх координація між БпЛА в умовах децентралізованого управління;

траєкторні – розрахунок групової траєкторії та траєкторії кожного БпЛА та забезпечення уникнення колізій;

оптимізаційні (мінімізації кількості БпЛА, часу, довжини маршрутів, витрат енергії тощо);

комунікаційні – орієнтовані на забезпечення заданої якості обміну даними між елементами СУ завдяки управлінню топологією, маршрутизацією, навантаженням, радіоресурсом, безпекою тощо [17-19].

За архітектурою системи управління поділяються на централізовані, децентралізовані та гібридні. На етапі планування НЦУ планує траєкторію польоту. В процесі функціонування СУ кожного БпЛА, корегуються заплановані команди управління НЦУ залежно від ситуації та пріоритету цільових функцій управління всією системою.

За математичною постановкою завдання управління можуть бути класифіковані за:

розподілом ресурсів, способами побудови маршрутів, призначенням (ударні, розвідувальні тощо), поведінки та координації рою тощо;

кількістю критеріїв оптимізації – однокритеріальні

та багатокритеріальні;

типом постановки вхідних даних – чіткі або нечіткі;
способом управління – статичні або динамічні;
рівнем постановки – загальні або часткові тощо.

На *п'ятому етапі* синтезу визначаються моделі управління групою (роєм) БпЛА. Для управління роєм БпЛА використовуються різні математичні моделі, які можуть застосовуватися на різних рівнях архітектури, забезпечуючи координацію, навігацію, планування траєкторії і розподіл завдань. Вибір моделі управління суттєво впливає на масштабованість, живучість, адаптивність та ефективність виконання місії групою (роєм). Різні моделі пропонують свої підходи до розподілу інформації та прийняття рішень. Зокрема, у *централізованій моделі* весь рій управляється з центру (НЦУ або з одного або декількох БпЛА-лідерів). Він збирає всю доступну інформацію від кожного БпЛА в групі (рої), аналізує її, приймає загальні рішення та надсилає індивідуальні команди кожному БпЛА. Перевагами централізованих моделей є оптимальне узагальнене планування, простота реалізації високорівневих завдань, які вимагають точної синхронізації, простота моніторингу – оператору простіше керувати всім роєм з однієї точки. Недоліки: низька живучість, обмежена масштабованість, значна залежність від якості зв'язку, низька адаптивність до динамічного середовища, повільна реакція на локальні зміни.

За *децентралізованої (розподіленої) моделі* кожен БпЛА в групі (рою) є автономним агентом, здатним приймати власні рішення на основі локальної інформації, отриманої від власних датчиків та/або найближчих сусідів. Глобальна поведінка групи (рою) виникає в результаті колективної взаємодії багатьох простих локальних правил. Перевагами розподілених моделей є висока відмовостійкість, відмінна масштабованість, висока адаптивність: група (рій) може швидко реагувати на зміни в локальному середовищі, оскільки рішення приймаються на місці, знижені вимоги до обміну даними (зв'язок потрібен лише з найближчими сусідами, а не з усіма БпЛА чи центром управління). Недоліки: складність глобальної оптимізації, потенційна непередбачуваність.

Гібридні моделі – прагнуть поєднати найкращі риси централізованого та децентралізованого підходів. Зазвичай це проявляється у вигляді багаторівневої ієрархії, де стратегічне планування високого рівня є централізованим (або квазіцентралізованим), а тактична координація та уникнення колізій на низькому рівні – децентралізованою. Перевагами гібридних моделей є можливість здійснення глобальної оптимізації для стратегічних рішень і локальної адаптивності для тактичних рішень, гнучкість (система управління може бути налаштована до конкретних вимог місії, розподіляючи функції між рівнями), підвищена надійність (централізовані елементи можуть дублюватися, тоді як децентралізовані елементи забезпечують стійкість до локальних змін). Недоліки: підвищена складність архітектури та алгоритмів, взаємодії рівнів. Прикладом гібридної моделі може бути система

управління, де оператор встановлює спільну місію (верхній рівень), НЦУ (або група БпЛА-лідерів) розбиває її на завдання для підгруп (кластерів) БпЛА (середній рівень), і кожен БпЛА в підгрупі автономно координує зі своїми сусідами свою частину завдання (нижній рівень).

Вибір моделі управління для групи (рою) БпЛА залежить від конкретних вимог до місії, умов навколишнього середовища, доступних обчислювальних ресурсів, а також вимог до оперативності, живучості та масштабованості завдань. Сучасні дослідження все більше тяжіють до гібридних і повністю децентралізованих мультиагентних рішень, особливо з розвитком штучного інтелекту і розподілених обчислень [5; 9], тому їх можна формалізувати такими моделями:

I Моделі планування місій для груп (рою) БпЛА зосереджені на перетворенні спільних цілей, поставлених оператором, у набір скоординованих завдань для всього рою БпЛА. Зазначена модель є основною і визначає «загальну стратегію» функціонування системи. Планування місій доцільно проводити за *декомпозиційними підходами*, що передбачає розкладання загальної місії групи (рою) на окремі завдання, які можуть виконуватися БпЛА або підгрупами (кластерами).

Ієрархічна декомпозиція. Місія розбивається на послідовні завдання, розподілених за рівнями деталізації. Наприклад, місія «Моніторинг лісів» розбивається на часткові завдання першого рівня «Розвідка периметра», «Сканування зон», «Пошук цілі» та елементарні завдання іншого рівня «Політ по траєкторії А», «Зробити знімок у точці Б».

Функціональна декомпозиція. Завдання рою розбивається на підзавдання за видами необхідних дій (наприклад, одна підгрупа (кластер) БпЛА займається розвідкою, інша – ретрансляцією даних, а третя – доставкою).

Просторова декомпозиція. Територія, на якій планується виконання місії розділяється на зони відповідальності, кожна з яких закріплена за підгрупою (кластером) або окремим БпЛА. Реалізується завдяки використанню алгоритмів, заснованих на розширенні хвильового фронту або розкладанні на комірки, які ділять область інтересів на підзавдання покриття для кожного БпЛА (наприклад, поділ великої площі земної поверхні на квадрати для картографування).

Моделі планування місій мають вирішальне значення, оскільки вони визначають здатність рою БпЛА автономно виконувати складні місії. Вони часто поєднують у собі елементи штучного інтелекту, теорії оптимізації та розподілених систем.

II Моделі розподілу завдань (Task Allocation Models) [4; 5; 13] здатні реалізувати оптимальну постановку підзавдань для конкретних БпЛА (після декомпозиції місії) для збільшення загальної продуктивності групи (рою) (наприклад, мінімізує час польоту, споживання енергії або максимізує покриття (розвідки) району виконання завдання). Моделі розподілу завдань доцільно розділити на декілька груп:

а) моделі, засновані на оптимізації (*Optimization-Based Models*) використовують лінійне/цілочисельне програмування для пошуку оптимальних завдань конкретним БпЛА з урахуванням обмежень (наявність БпЛА у потрібному місці (точці простору), можливості БпЛА, час на виконання, наявні ресурси). Недоліком таких моделей є складність обчислення для роїв з великою кількістю БпЛА;

б) ринкові моделі/аукціони (*Market/Auction-Based Models*) в яких передбачається, що БпЛА «торгуються» за певне завдання, яке він здатний виконати, пропонуючи «ставки». Існують такі види ринкових моделей:

аукціон окремих ресурсів (*Single-Item Auction*), сутність якого полягає в тому, що БпЛА декларує витрати, наприклад часу або енергії, на виконання одного завдання. Завдання призначається тому БпЛА (кластеру), який запропонує найнижчу вартість витрат;

комбінаторний аукціон (*Combinatorial Auction*), сутність якого полягає в тому, що БпЛА можуть робити ставку на виконання пакетів завдань, що дає змогу враховувати синергію (наприклад, дешевше виконувати два завдання одночасно одним БпЛА, ніж окремо різними БпЛА). Реалізація такої моделі є складнішою, але ефективність виконання завдань збільшується;

протокол контрактної мережі (*Contract Net Protocol*) є розподіленим, де БпЛА можуть запитувати «пропозиції» від інших БпЛА для виконання завдань;

в) евристичні та метаевристичні моделі (*Heuristic and Metaheuristic Models*) використовуються, коли точне розв'язання задачі оптимізації занадто складне або займає багато часу;

г) жадібні алгоритми, в яких передбачається, що на кожному кроці вибирається найкраще доступне рішення, без прогнозування подальших подій. Перевагою таких алгоритмів є незначна обчислювальна складність, а недолік – не гарантує оптимальне виконання завдання.

Зазначені моделі можуть використовувати алгоритми ройового інтелекту: *рій частинок* (PSO) – моделює соціальну поведінку зграї птахів для пошуку оптимального розподілу завдань; *мурашина колонія* (ACO) – імітує пошук мурашками, де феромони (віртуальні) допомагають знайти оптимальні маршрути та розподілити певні завдання.

III *Моделі поведінки (Behavior-based) та координації рою БпЛА* [11–14] описують, взаємодію БпЛА між собою для досягнення потрібної колективної поведінки для досягнення мети місії. Моделі поведінки та координації розрізняють на:

моделі, засновані на правилах (прикладі децентралізованих моделей) – імітують прості правила взаємодії, що спостерігаються в біологічних роях;

модель «Boids» (правила Бойда) – кожен БпЛА (бойд) підкоряється трьом основним правилам: відокремлення (*Separation*), що передбачає взаємодію БпЛА тільки з сусідами в межах певного радіусу для уникнення колізій; вирівнювання (*Alignment*) – узгодження напрямку руху БпЛА із середнім напрямком руху сусідів; згуртованість (*Cohesion*) –

прагнення БпЛА до центру маси сусідів, щоб залишитися в групі;

флокінг (*Flocking*)/вирівнювання (*Alignment*) [12; 13] – забезпечують рух БпЛА в одному напрямку, з однаковою швидкістю і на певній (постійній) відстані один від одного;

моделі потенційного поля (*Potential Field*) [14; 15] – передбачають моделювання переміщення БпЛА у віртуальній моделі «поля», де ціль їх притягує, а перешкоди відштовхують;

моделі, засновані на консенсусі (*Consensus-Based Models*) [4] – використовуються для координації певних параметрів між агентами (БпЛА), наприклад швидкості польоту, напрямку руху, визначення положення у просторі;

алгоритми середнього консенсусу – кожен БпЛА оновлює інформацію про свій стан на основі середньозваженого показника, поступово сходяться до спільного значення з сусідніми БпЛА;

алгоритми лідера послідовників (*Leader-Follower*) – передбачає позначення одного або кількох БпЛА лідерами, що визначають загальний рух рою (кластера), в той час як інші БпЛА, супроводжуючі лідера, зберігають задану позицію відносно лідерів;

моделі на основі графів (*Graph-Based Models*) – рій моделюється у вигляді графу, в якому вузлами є БпЛА, а ребра – зв'язки між ними. Обмін між вузлами здійснюється передачею інформаційних і координаційних повідомлень. До інформаційних повідомлень слід віднести: параметри стану БпЛА – координати, швидкість, курс, висота, заряд акумулятора, технічний стан, цілі (завдання); дані датчиків (локальні) – інформація про місцеві перешкоди, виявлені цим БпЛА. Координаційні повідомлення використовуються з метою утримання просторової фігури рою та уникнення колізій для: алгоритмів консенсусу (наприклад, «мое значення X така-то»), алгоритмів аукціону («моя ставка для завдання Y така-то»);

моделі, що базуються на оптимізаційних задачах (*Optimization-based*) визначення певного критерію (наприклад, мінімізація часу виконання місії, максимальне охоплення території тощо). Розрізняють централізовану оптимізацію – для розв'язання складної задачі оптимізації для цілого рою, яка може бути складно обчислювальною та розподілену оптимізацію (кожен БпЛА виконує індивідуальне (часткове) завдання, обмінюючись інформацією з сусідами).

IV *Моделі планування траєкторії (Trajectory Planning Models)* використовуються для побудови безпечних та оптимальних траєкторій руху окремих БпЛА та рою в цілому. Наведемо відомі моделі, що можуть бути використані для планування траєкторій:

а) *моделі на основі пошуку (Search-Based Models)* використовують алгоритми пошуку на графіку або дискретизованому просторі;

A (*A-star*) алгоритм – евристичний алгоритм для визначення найкоротшого шляху на графі, часто використовується для навігації окремого БпЛА або планування траєкторії лідера;

RRT (Rapidly-exploring Random Tree) (RRT-Star) алгоритми – швидко будують дерево можливих траєкторій у просторах високої розмірності, що корисно для планування у складних, невідомих або динамічних середовищах. RRT передбачає оптимізацію шляху;

б) моделі, засновані на оптимізації (*Optimization-Based Models*) формулюють планування траєкторії як оптимізаційну задачу;

в) моделі на основі логіки (*Logic-based*) [13] використовують правила і логічні конструкції для прийняття рішень щодо зміни траєкторії польоту. Для реалізації таких моделей використовуються:

кінцеві автомати – БпЛА перемикаються у різні режими управління (автономного, централізованого тощо) залежно від зовнішніх умов;

продукційні правила «ЯКЩО-ТОДИ» для реагування на різні ситуації (ЯКЩО під час виконання місії роєм БпЛА відхилився від польотного завдання, ТОДИ потрібно скорегувати поточну траєкторію польоту для повернення в стрій рою);

г) сплайни та криві Безье – математичні криві, що використовуються для створення плавних і безперервних траєкторій, які можна інтерполювати;

д) стохастичні моделі (*Stochastic Models*), які, наприклад, використовують імовірнісні дорожні карти PRM (Probabilistic Roadmaps) та будують графік досяжних станів шляхом випадкової вибірки конфігураційного простору, а потім використовуються алгоритми пошуку шляху на цьому графі.

V Моделі управління рухом БпЛА – низькорівневі моделі управління БпЛА під час польоту в контексті їх використання у складі групи (рою) [2; 3]. Процес управління рухом (диспетчер польоту) передбачає генерацію конкретних керуючих дій двигунами та механізмами для утримання БпЛА на заданій траєкторії. Польотні контролери, реалізують моделі управління рухом на практиці, відповідають за стабілізацію у просторі, керування під час польоту і координують всі бортові системи БпЛА. Та використовуючи дані, що надходять із підсистеми навігації та орієнтування. Види моделей управління рухом БпЛА:

а) класичні моделі керування на основі зворотного зв'язку – найбільш поширені та фундаментальні моделі, що використовуються для стабілізації у просторі БпЛА на основі PID-контролерів (пропорційно-інтегрально-диференціальний), що обчислює похибки вимірювання параметрів. Це дає змогу стабілізувати положення апаратів у просторі, координувати їхні дії та підтримувати потрібну формацію (фігуру) рою БпЛА. Забезпечують стабілізацію кутів орієнтації (крен, тангаж, ривання), утримання на висоті, швидкості та місцеположення. Перевагами є простота реалізації, відносно простий у налаштуванні, а недоліками є те, що класична модель керування може виявитися не оптимальною для систем з швидкоплинною динамікою, або вираженою нелінійністю, а також потребує точного налаштування коефіцієнтів регулятора;

б) модель прогнозного керування використовує математичне моделювання польоту БпЛА для прогнозування його майбутньої поведінки. На кожному етапі управління послідовність керуючих дій оптимізується так, щоб мінімізувати ймовірність виникнення наступної помилки та не перевищити обмеження (наприклад, швидкості, прискорення, кутів Ейлера). На НЦУ для БпЛА позначається тільки перша керуюча дія, після чого процес повторюється. Прогнозне керування – потужний інструмент для інтегрованого планування траєкторій та управління рухом БпЛА складними траєкторіями, забезпечення уникнення перешкод у режимі реального часу, управління за наявності обмежень характеристик і врахування динаміки. Перевагами є можливість роботи в умовах обмежень, хороша адаптація до динамічного середовища, підвищена точність прийняття рішення системи управління. Недоліками є збільшення обчислювальних витрат, залежність від точності моделі, складність налаштування;

в) нелінійні регулятори – спеціально розроблені для роботи з нелінійною динамікою БпЛА (наприклад, мультикоптерів), що дає змогу досягти збільшеної продуктивності порівняно з лінеаризованими моделями, що виконують спрощені розрахунки з низькою точністю.

Отже, вибір конкретної моделі управління рухом залежить від багатьох факторів, а саме: типу БпЛА, складності його динаміки, вимог до точності та надійності, наявних обчислювальних ресурсів на борту. Сучасні рої часто використовують комбінацію наведених моделей, наприклад PID-контролери – для базової стабілізації та MPC або SMC для більш високого рівня забезпечення руху БпЛА по траєкторії та врахування обмежень.

VI Моделі навчання та адаптації (*Learning and Adaptation Models*) – дають змогу рою БпЛА навчатися та адаптуватися до мінливих або невідомих умов [9–13]. До таких моделей слід віднести:

а) моделі навчання з підкріпленням RL (Reinforcement Learning) – агенти (БпЛА) вивчають оптимальні стратегії поведінки та взаємодії завдяки пробама та помилкам, отримуючи «винагороду» за правильні вчинки та «покарання» за неправильні;

б) Q-learning – алгоритм RL для пошуку оптимальної стратегії.

в) глибоке навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning – DRL) – використовує нейронні мережі для апроксимації функцій значень або політик, даючи змогу працювати з великими та неперервними просторами станів.

г) еволюційні алгоритми (Evolutionary Algorithms) – натхненні принципами природного відбору, використовуються для визначення оптимальних параметрів поведінки або конфігурацій групи (рою).

Компоненти, що реалізують зазначені моделі: бортовий комп'ютер (польотний контролер) – процесор БпЛА;

навігаційні та сенсорні модулі – GPS/ГЛОНАСС, IMU (інерційна одиниця вимірювання), барометр,

магнітометр, камери, радар;

модуль зв'язку – для обміну даними з НЦУ та іншими БпЛА);

виконавчі механізми – двигуни, сервоприводи тощо.

VII *Моделі управління комунікаційною системою* передбачають управління топологією комунікаційної мережі, маршрутизацією, навантаженням, безпекою передачі тощо [16–19]. Цільові функції (критерії) управління групою (роєм) БпЛА визначають кількісні показники, які СУ групою (роєм) БпЛА прагне оптимізувати у процесі функціонування. Вони формуються залежно від специфіки місії та бажаних особливостей поведінки групи (рою). Функції управління можуть бути як індивідуальними для кожного БпЛА (кластера), так і колективними для всього рою. Розглянемо критерії управління роєм за групами:

а) критерії, пов'язані з ефективністю виконання місії спрямовані на оптимальне досягнення основних цілей місії. До таких можна віднести:

час виконання місії T_m – забезпечується мінімізацією множини часу виконання завдань кожним БпЛА зі складу рою, актуально використовувати для бойового застосування та термінової доставки:

$$T_m = \min\{T_{zi}\}, \quad (1)$$

де T_{zi} – час виконання завдання i -м БпЛА.

Критерій актуальний для бойового застосування та термінової доставки;

охоплення площі P – забезпечується охопленням максимальної площі $\max(P)$ з урахуванням наданих ресурсів або забезпечення повного покриття з використанням мінімальної кількості ресурсів. Критерій актуальний для завдань моніторингу, розвідки та рекогносцирування;

витрати ресурсів E (енергії, пального) – мінімізуються для збільшення тривалості місії або зменшення експлуатаційних витрат:

$$\min E = \sum_{i=1}^I e_i, \quad (2)$$

де e_i – енергія, що споживається i -м БпЛА,;

I – загальна кількість БпЛА в рою.

Наприклад, БпЛА можуть обирати траєкторії та швидкості, які мінімізують споживання електроенергії та пального, забезпечуючи енергоефективність;

точність виконання завдань $P_{\text{точ}}$ – максимізується $\max(P_{\text{точ}})$, що забезпечить точність збору даних, визначення координат цілі, доставку вантажу в точку призначення;

довжина маршруту рою L – мінімізується для забезпечення енергоефективності та зменшення часу виконання місії:

$$\min L = \sum_{i=1}^I l_i, \quad (3)$$

де l_i – довжина траєкторії польоту i -го БпЛА.

Зазначений критерій актуальний для логістичних завдань.

б) критерії, пов'язані з безпекою та живучістю – спрямовані на забезпечення безпечної експлуатації рою і його стійкості до відмов. До них можна віднести критерії:

уникнення колізій $N_{\text{кол}}$ – мінімується $\min(N_{\text{кол}})$ для зменшення ймовірності виникнення зіткнень між БпЛА та із зовнішніми перешкодами;

живучість/відмовостійкість рою $P_{\text{жив}}$ – максимізується $\max(P_{\text{жив}})$ для успішного виконання місії роєм у разі відмови одного (декількох) БпЛА та характеризує здатність системи управління швидко перерозподіляти завдання після відмови;

ризик виявлення $\min(R_{\text{вияв}})$ – мінімується $\min(R_{\text{вияв}})$ для зменшення можливостей виявлення оптичною, акустичною, радіотехнічною розвідкою.

Критерій актуальний для військових та розвідувальних місій.

в) критерії, пов'язані з координацією та поведінкою рою, що визначають бажану колективну поведінку та взаємодію БпЛА. До таких можна віднести *відхилення від конфігурації рою* – мінімізується $\min(D_{\text{відл}})$ для зменшення різниці між координатами поточного положення i -го БпЛА та координатами встановленої (потрібної) для виконання місії позиції у просторовій фігурі рою.

г) критерії, пов'язані з ефективністю управління комунікаційною підсистемою:

заданий (максимальний) рівень продуктивності каналів, маршрутів, напрямків передачі інформації;

заданий рівень зв'язності, завантаженості між БпЛА;

задана топологія комунікаційної мережі, що забезпечує функціонування рою.

Підсумовуючи варто зазначити, що раціональний вибір і формулювання критеріїв мають вирішальне значення для проектування ефективної системи управління роєм БпЛА, оскільки вони безпосередньо визначають основи функціонування системи управління та її здатність досягати поставлених цілей.

В свою чергу зауважимо, що управління роєм БпЛА – це складний процес, який можна розбити на кілька основних етапів, що охоплюють весь життєвий цикл місії. Тому доцільно розглянути узагальнений алгоритм управління групою (роєм) БпЛА:

планування місії – початковий і стратегічний етап, на якому визначаються загальні мета та завдання місії і готується початковий план дій для групи (рою);

визначення цілей високого рівня – постановка загальних цілей (наприклад, «моніторинг території противника», «пошук цілей у заданому районі»);

збір та аналіз інформації про район місії (карти, рельєф, погодні умови, заборонені для польотів зони, відомі перешкоди);

декомпозиція завдань – розбиття загального завдання на часткові, керовані підзавдання, які можна розподілити між БпЛА (кластерами);

попередній розподіл ресурсів і завдань – визначення потрібної кількості БпЛА, їх типів, формування підгруп (кластерів) та первинний розподіл ролей (визначення лідера рою, лідерів кластерів) та завдань;

планування маршруту й просторової фігури рою (попередне) групи або підгруп для різних етапів місії; *моделювання та симуляція* – перевірка розробленого плану місії в середовищі моделювання, для виявлення потенційних проблем та оптимізація цього плану;

розгортання та ініціалізація групи (рою) відповідно до розробленого плану місії. Цей етап містить: підготовку рою БпЛА, що передбачає заряджання акумуляторів, перевірку систем, завантаження польотного завдання та початкових параметрів місії; переміщення БпЛА до точок запуску та фізичне розгортання; ініціалізація мережі зв'язку між БпЛА та НЦУ. Перевірка стану каналів зв'язку; запуск (зліт) БпЛА;

формування початкової просторової фігури рою – БпЛА займають вихідні позиції та формують задану конфігурацію (просторову матрицю) до початку основного етапу місії;

виконання місії та координація – це основний оперативний етап, на якому рій активно виконує поставлені завдання, забезпечуючи взаємодію між БпЛА та координуючи свої дії з НЦУ і лідером рою (лідерами кластеру) в режимі реального часу. Під час виконання індивідуальних завдань окремих БпЛА рухається заданим йому маршрутом, виконує конкретні дії (збір даних, доставка, моніторинг, скидання боєприпасів). Координація рухів БпЛА і поведінки групи (рою) в цілому передбачає: динамічне уникнення зіткнення між БпЛА в середині рою та із зовнішніми перешкодами; автоматичну корекцію місцеположення БпЛА для підтримки заздалегідь заданого (запрограмованого) налаштування підсистеми управління БпЛА;

синхронізація діяльності БпЛА – послідовне виконання колективних завдань (наприклад, одночасне проходження точки, спільний пошук);

динамічний перерозподіл завдань між БпЛА у разі виявлення (призначення) нових цілей або зміни умов під час польоту;

збір і первинна обробка даних про окремі БпЛА рою – БпЛА безперервно збирають інформацію зі своїх датчиків (трубка Піто, гіроскоп, GPS тощо) та здійснюють її первинну обробку на борту;

взаємодія між БпЛА – постійний обмін даними (місцеположення, швидкість, рівень заряджання батареї, розходу пального тощо) між сусідніми БпЛА (лідером кластеру) для забезпечення децентралізованого прийняття рішень стосовно сусідніх БпЛА (наприклад, використання алгоритмів консенсусу, правил поведінки);

моніторинг і діагностика рою БпЛА – безперервний процес спостереження СУ за станом групи (рою) і ходом виконання місії, а також виявлення відхилень від запланованого завдання;

передача даних про стан кожного БпЛА для забезпечення централізованого прийняття рішень НЦУ, (БпЛА-лідером групи (рою));

моніторинг інформації з сенсорів (фото, відео, ІЧ тощо) усіх БпЛА про зміни в районі виконання завдань (нові перешкоди, зміна погодних умов);

оцінювання прогресу місії – порівняння поточного

стану виконання завдань із запланованим (прогнозованим);

діагностика та виявлення несправностей – виявлення відмов окремих БпЛА або збоїв у роботі систем рою;

адаптація та перепланування – на основі даних моніторингу виконання місії роєм БпЛА, система приймає рішення про потребу коригування поведінки рою БпЛА або плану місії. Цей етап тісно пов'язаний з етапами виконання;

реакція на динамічні зміни в навколишньому середовищі – корегування траєкторій польоту БпЛА або просторової фігури рою БпЛА з урахуванням виникнення нових перешкод або змін погодних умов;

обробка відмов – у разі виходу з ладу одного або декількох БпЛА автоматичний перерозподіл призначених їм завдань між іншими елементами рою;

оптимізація місії в режимі реального часу – визначення кращих способів для реалізації завдань, що залишилися не виконаними на основі поточних даних від системи управління рою БпЛА;

втручання оператора – надання можливості людині-оператору вручну змінювати план місії або втручатися в процес управління в критичних ситуаціях;

повернення додому – передбачає автоматичне або контрольоване повернення БпЛА до заданих точок приземлення;

посадка. БпЛА – безпечна приземлення всіх БпЛА у визначених точках. Виконання логістичних завдань стосовно збору БпЛА та їх доставки до місць обслуговування і зберігання;

оцінювання результатів виконання місії – зняття даних з БпЛА їх обробка, формування звітів про підсумки виконання місії та розроблення рекомендацій для їх урахування під час планування та проведення наступних операцій;

технічне обслуговування та ремонт – проведення робіт щодо підготовки БпЛА, НЦУ до наступних місій (заряджання акумуляторних батарей, перевірка засобів комунікацій, польотних контролерів, сенсорів, усунення несправностей).

навчання (тренування) операторів.

Етапи наведеного алгоритму управління групою (роєм) БпЛА перетинаються і утворюють безперервний цикл управління.

Сьомий етап синтезу передбачає визначення множини варіантів реалізації СУ та визначення оптимального. На основі наведених моделей, алгоритмів управління формується множина способів реалізації системи управління, де враховуються:

технології, що використовуються для створення елементів рою;

номенклатура технічних засобів, що застосовуються для виконання місії;

апаратне та програмне забезпечення.

З урахуванням способів реалізації системи управління, вхідних даних, критеріїв та моделей оцінювання ефективності управління формується множина варіантів побудови системи управління *W*. Загальний вираз для δ -го варіанту побудови системи

управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів можна записати так:

$$W_{\delta} = G(Y(UAV, U), \Lambda, E, R, Z, A, C, F_l, AV, K, T_{cy}, AP)), \quad (4)$$

де Y – реалізація вихідного процесу управління;

UAV – група БПЛА;

U – управляючий вплив СУ;

Λ – потоки даних СУ;

E – зовнішні впливи;

R – виділений ресурс;

Z – цілі управління;

A – архітектура системи управління;

C – склад системи управління;

F_l – розподіл функцій за l -м рівнем управління, $l=1, \dots, L$;

AV – алгоритми управління складовими СУ;

K – кількість посадових осіб;

T_{cy} – технології реалізації СУ;

AP – визначені апаратні та програмні засоби;

l – рівні управління СУ.

Оцінювання варіантів побудови СУ має проводитися за наведеними вище критеріями. Для отримання оптимального варіанту СУ доцільно використовувати метод (векторної) послідовної оптимізації з використанням принципу максимізації суми зважених критеріїв з використанням методів експертних оцінок. Тоді раціональний (оптимальний) варіант системи управління:

$$W^* = \text{opt } W_{\delta}, \delta = \overline{1, \Omega}. \quad (5)$$

Архітектура, моделі, алгоритми системи управління має відповідати вимогам, які висуваються до СУ групою (роєм) БПЛА. Система управління має бути ієрархічною організаційно-технологічною системою, що забезпечує гібридне (централізоване / децентралізоване) управління групою (роєм) БПЛА. Управління має здійснюватися в реальному масштабі часу та забезпечувати заданий рівень живучості групи (рою) БПЛА під час виконання місії. Система управління має створюватися з орієнтацією на нові інформаційні та комунікаційні технології. Аналіз варіантів побудови СУ слід здійснювати за наведеними вище критеріями.

Для отримання оптимального варіанту СУ мережами доцільно використовувати метод (векторної) послідовної оптимізації з використанням принципу максимізації суми зважених критеріїв з використанням методів експертних оцінок. Тоді раціональний (оптимальний) варіант системи управління мережами: $W^* = \text{opt } W_{\delta}, \delta = \overline{1, \Omega}$.

Отже, автором на рис. 1 наведено структурну схему синтезу системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів, на рис. 2 наведено класифікацію завдань системи управління такими групами. Крім того, вираз (4) у загальному вигляді формалізує процес побудови варіанту системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Наприкінці зазначимо, що синтез системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів – це складним, багатоетапним науково-практичним завданням, що може бути виконане завдяки впровадженню передових технологій, реалізації розподілених систем і робототехніки, інтеграції алгоритмів штучного інтелекту. Метою синтезу є створення такої системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів, яка здатна забезпечити автономне, адаптивне та ефективне виконання місії у найскладніших умовах, збільшуючи можливості окремих безпілотних літальних апаратів і зменшуючи навантаження на людину-оператора. У статті визначено послідовність та основні етапи синтезу: принципи, функції, архітектура, моделі (алгоритми) управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів, визначення варіантів побудови системи управління. Наведені рисунки систематизують процес синтезу системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів, з урахуванням етапів управління, функцій і завдань та взаємозв'язків між елементами системи управління групою (роєм) таких апаратів.

Класифікація завдань управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів охоплює їх поділ за етапами функціонування, об'єктами впливу та функціональним призначенням. На основі такої класифікації розроблено методологічні засади синтезу системи управління, що поєднують можливості централізованих, децентралізованих та гібридних архітектур. Запропонований підхід дає змогу комплексно відобразити структуру процесу управління роєм безпілотних літальних апаратів, забезпечити узгодженість дій усіх елементів рою та створити умови для підвищення ефективності виконання тактичних і оперативних завдань у динамічних умовах сучасних бойових дій.

Новизна отриманих результатів зводиться до системного поєднання принципів децентралізації, самоорганізації, адаптивності та оптимізації, а також у вперше структурованій етапності створення системи управління. Запропонований загальний вираз побудови системи управління із чітким розподілом завдань, що забезпечує цілісність та логічну узгодженість процесу управління. Теоретичною значущістю викладеного у дослідженні є розширення наукових уявлень про мультиагентні системи, розробку класифікацій і принципів, які можуть слугувати основою для подальшого розвитку теорії адаптивного управління у складних і нестабільних умовах. Практичною цінністю роботи є можливість впровадження запропонованої системи управління та алгоритмів у програмно-апаратні комплекси управління групами (роями) безпілотних літальних апаратів, що підвищить їхню живучість, масштабованість та ефективність у бойових умовах.

Напрямом подальших досліджень слід вважати подальше впровадження алгоритмів штучного інтелекту в багатоагентну систему управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів.

Список бібліографічних посилань

1. Лупандін В. А., Мегельбей Г. В., Машко О. Й., Куртсеітов Т. Л., Міроненко П. О. Основні тенденції створення та застосування груп безпілотних літальних апаратів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. № 2 (35). С. 88–94. DOI: 10.30748/ntps.2019.35.11. 2. Журавська І. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА : монографія. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. 192 с. 3. Погудіна О. К. та ін. Методологія формування інтелектуальної складової агентної системи рою безпілотних літальних апаратів: монографія. Харків: НАУ ім. М. С. Жуковського «ХАД», 2021. 219 с. 4. Smith J., Johnson A. Decentralized Consensus Algorithms for Swarm Robotics. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 2022. № 15(3). С. 123–135. 5. Chen L., Wang Y. A Hybrid Control Architecture for Large-Scale UAV Swarms. *IEEE Transactions on Robotics*. 2021. № 37(2). P. 456–468. DOI: 10.1109/TRO. 2020.3015678. 6. Davies P., Jones R. Formation Control of Heterogeneous UAV Swarms using Model Predictive Control. *Aerospace Science and Technology*. 2020. № 98. P. 105689. 7. White M., Green T. Deep Reinforcement Learning for Autonomous Swarm Navigation in Complex Environments. *AI Communications*. 2024. № 55(4). P. 321–334. 8. Kumar R., Singh J. Deep Reinforcement Learning for Decentralized Swarm Control: A Survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2023. № 68. P. 123–145. 9. Wang H., Li Z. Multi-Agent Reinforcement Learning for Collaborative Task Allocation in UAV Swarms. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2024. № 54(1). P. 234–245. DOI: 10.1109/TCYB.2023.3301234. 10. White M., Green T. Deep Reinforcement Learning for Autonomous Swarm Navigation in Complex Environments. *AI Communications*. 2024. № 55(4). P. 321–334. DOI: 10.3233/AIC-230556. 11. Davies P., Jones R. Formation Control of Heterogeneous UAV Swarms using Model Predictive Control. *Aerospace Science and Technology*. 2020. № 98. P. 105689. DOI: 10.1016/j.ast.2020.105689. 12. Floreano D., Mura A. *Bio-Inspired Swarm Robotics: A Review of Algorithms and Applications*. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems. 2022. № 5. P. 234–256. DOI: 10.1146/annurev-robot-031020-090209. 13. Smith J., Johnson A. Decentralized Consensus Algorithms for Swarm Robotics. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 2022. № 15(3). P. 123–135. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103789. 14. Nelson D. R., Barber D. B., McLain T. W., Beard R. W. Vector Field Path Following for Miniature Air Vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*. 2007. Vol. 23 (3). P. 519–529. 15. Muslimov T. Z. Algorithms of Autonomous Fixed-wing UAVs Formation Control via Vector Field Method. *Systems of Control, Communication and Security*. 2019. № 4. P. 187–214. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10407. 16. Brown S., et al. Optimizing Communication Topologies in UAV Swarms for Search and Rescue Missions. *International Journal of Intelligent Systems*. 2023. № 42(1). P. 78–91. 17. Романюк В. А., Степаненко Є. О., Панченко І. В., Восколович О. І. Літаючі самоорганізуючі мережі. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2017. № 1. С. 104–114. 18. Гримуд А. Г., Романюк В. А. Побудова системи управління групою тактичних безпілотних літальних апаратів. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2020. № 3. С. 63–73. 19. Saffre F., Hildmann H., Anttonen A. Force-Based Self-Organizing MANET/FANET with a UAV Swarm. *Future Internet*. 2023. № 15 (9). Article 315. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15090315>. 20. Tsao Kai-Yun, Girdler T., Vassilakis V. G. A survey of cyber security threats and solutions for UAV communications and flying ad-hoc networks. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102894>.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE SYNTHESIS OF A CONTROL SYSTEM FOR A GROUP (SWARM) OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

ROMANIUK Valery, Doctor of Technical Sciences, Professor, Military Institute of Telecommunications and Information Technologies named after the Heroes of Kruty, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-6218-2327>

HRYMUD Andrii, PhD, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-4012-5185>

Formulation of the problem in general. In a dynamic tactical (operational) environment and with active opposition from the enemy, the effective functioning of a control system for a group (swarm) of uncrewed aerial vehicles is impossible without an adaptive and stable control system. Managing such a system involves coordinating the actions of uncrewed aerial vehicles, maintaining network topology, ensuring communication quality, and responding to changing conditions. The object of the study is the process of managing the functioning of a group (swarm) of uncrewed aerial vehicles, built based on the interaction of a set of autonomous aerial platforms that ensure the collective performance of assigned tasks. **The article's purpose** is to develop methodological foundations for synthesising a control system for a group (swarm) of uncrewed aerial vehicles to ensure the performance of tactical and operational tasks by the Armed Forces of Ukraine.

Research methods. A set of theoretical and applied research methods was used to prepare the article, particularly analysis, synthesis, generalisation, and a systematic approach. The analysis method was used to study the structure, functional features, and architecture of control systems for a group (swarm) of uncrewed aerial vehicles. The synthesis method made it possible to build a generalised model of the control system synthesis and determine its primary functions, tasks, principles, and architectural options. The systematic approach provided a comprehensive view of the interaction of functional subsystems – communication, navigation, diagnostic, and executive—in a changing environment and under enemy influence. In addition, the study considers modern technological solutions, particularly the use of decentralised algorithms, artificial intelligence, and self-organised networks, which ensure survivability, scalability, and adaptability.

Literature review. After analysing the publications of leading researchers in the field of unmanned aerial vehicle control systems, it was determined that there are no systematic works in the available sources that reflect the complexity and phased approach to solving the problem of synthesising a control system for a group (swarm) of uncrewed aerial vehicles.

Research results. The article discusses key aspects of the synthesis and functioning of control systems for groups (swarms) of uncrewed aerial vehicles. It examines the topic's relevance, analyses the latest achievements in this field, and describes in detail the sequence of synthesis stages: analysis of initial data, principles of control system design, its architecture, main functions, models, and control algorithms. A classification of unmanned aerial vehicle group (swarm) control tasks is

presented, covering their division by stages, objects of influence, purpose, functional purpose, architecture, and mathematical formulation. The methodological foundations for synthesising a control system for swarms (groups) of uncrewed aerial vehicles have been developed, considering the architectures of interaction models. Particular attention is paid to decentralised models of interaction and coordination of unmanned aerial vehicle actions. An approach has been proposed that comprehensively reflects the structure of the unmanned aerial vehicle swarm control process. The prospects for the development and application of such systems have been identified.

Research novelty. The paper presents the first methodological framework for synthesising an unmanned aerial vehicle swarm control system that combines the capabilities of centralised, decentralised, and hybrid architectures. This approach allows for a systematic representation of the control process structure and ensures a targeted selection of appropriate models and methods at each level of the system's operation.

Theoretical and practical significance. The article defines the methodological foundations for synthesising a control system formed by a group (swarm) of uncrewed aerial vehicles, which makes it possible to create an effective intelligent control system for military purposes. The main synthesis stages are highlighted, and the goals, functions, and control tasks are formulated, providing a structured basis for building adaptive and scalable control systems in combat conditions. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of creating, based on the proposed methodological approaches, control algorithms for their implementation in software and hardware complexes for organising the work of unmanned aerial vehicle swarms, which will increase their stability, scalability, and effectiveness in military operations at all levels. A promising direction for further research is the integration of artificial intelligence algorithms into a multi-agent control system for a group (swarm) of uncrewed aerial vehicles to increase their level of autonomy and adaptability.

Conclusion and future work. The proposed approach makes it possible to comprehensively reflect the structure of the unmanned aerial vehicle swarm management process, ensure the coordination of all swarm elements, and create conditions for improving the effectiveness of tactical and operational tasks in the dynamic conditions of modern combat operations. A crucial direction for future research involves further implementing artificial intelligence algorithms within the multi-agent control system for unmanned aerial vehicle groups (swarms). This integration promises to enhance the capabilities of these systems significantly.

Keywords: group (swarm) of uncrewed aerial vehicles, swarm control system, autonomous control, coordination.

References

1. Lupandin, V. A., Megelbei, H. V., Matsko, O. Y., Kurtseitov, T. L. & Mironenko, P. O., (2019). Main trends in the creation and application of unmanned aerial vehicle groups. *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. 2(35), 88-94. DOI: 10.30748/nitps.2019.35.11.
2. Zhuravska, I. (2019). Heterogeneous Computer Networks for Critical Applications Based on UAV Swarms and Flocks: Monograph – Mykolaiv: Petro Mohyla Black Sea National University Publishing House.
3. Pohudina, O. K. et al., (2021). Methodology for forming the intellectual component of an agent system for a swarm of uncrewed aerial vehicles: monograph. Kharkiv: National Aerospace University «KhAI» named after N. E. Zhukovsky.
4. Smith, J. & Johnson, A., (2022). Decentralised Consensus Algorithms for Swarm Robotics. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 15(3), 123-135.
5. Chen, L. & Wang, Y., (2021). A Hybrid Control Architecture for Large-Scale UAV Swarms. *IEEE Transactions on Robotics*. 37(2), 456-468. DOI: 10.1109/TRO.2020.3015678.
6. Davies, P. & Jones, R., (2020). Formation Control of Heterogeneous UAV Swarms using Model Predictive Control. *Aerospace Science and Technology*. 98, 105689.
7. White, M., Green, T., (2024). Deep Reinforcement Learning for Autonomous Swarm Navigation in Complex Environments. *AI Communications*, 55(4), 321-334.
8. Kumar, R. & Singh, J. (2023) Deep Reinforcement Learning for Decentralised Swarm Control: A Survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 68, 123-145.
9. Wang, H. & Li, Z., (2024). Multi-Agent Reinforcement Learning for Collaborative Task Allocation in UAV Swarms. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 54(1), 234-245. DOI: 10.1109/TCYB.2023.3301234.
10. White, M. & Green, T., (2024). Deep Reinforcement Learning for Autonomous Swarm Navigation in Complex Environments. *AI Communications*. 55(4), 321-334. DOI: 10.3233/AIC-230556.
11. Davies, P. & Jones, R., (2020) Formation Control of Heterogeneous UAV Swarms using Model Predictive Control. *Aerospace Science and Technology*. 98, 105689.
12. Floreano, D. & Mura, A., (2022). *Bio-Inspired Swarm Robotics: A Review of Algorithms and Applications*. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 5, 234-256. DOI: 10.1146/annurev-robot-031020-090209.
13. Smith, J. & Johnson, A., (2022). Decentralised Consensus Algorithms for Swarm Robotics. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 15(3), 123-135. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103789.
14. Nelson, D. R., Barber, D. B., McLain, T. W., Beard, R. W., (2007). Vector Field Path Following for Miniature Air Vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, 23 (3), 519-529.
15. Muslimov, T. Z., (2019). Algorithms of Autonomous Fixed-wing UAVs Formation Control via Vector Field Method. *Systems of Control, Communication and Security*. 4, 187-214. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10407.
16. Brown, S., et al., (2023). Optimising Communication Topologies in UAV Swarms for Search and Rescue Missions. *International Journal of Intelligent Systems*. 42 (1), 78-91.
17. Romaniuk, V. A., Stepanenko, Ye. O., Panchenko, I. V., & Voskolovych, O. I., (2017). Flying Self-Organising Networks. *Collection of Scientific Works of MITI*. 1, 104-114.
18. Hrymud, A. H. & Romaniuk, V. A., (2020). Construction of a Control System for a Group of Tactical Unmanned Aerial Vehicles. *Collection of Scientific Works of MITI*. 3, 63-73.
19. Saffre, F., Hildmann, H. & Anttonen, A., (2023). Force-Based Self-Organising MANET/FANET with a UAV Swarm. *Future Internet*, 15 (9), 315. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15090315>.
20. Tsao Kai-Yun, Girdler T., Vassilakis V. G., (2022). A survey of cyber security threats and solutions for UAV communications and flying ad-hoc networks DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102894>.

Рукопис надійшов до редакції 05.08.2025

Рукопис прийнято до друку після рецензування 21.08.2025

Дата публікації 29.08.2025