



№ 4 (2), 2024

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АЛГОРИТМИ ІНТЕГРОВАНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

І. Берневек [ORCID: 0009-0000-2122-0545], О. Головка [ORCID: 0009-0006-3004-3580], Т. Роса [ORCID: 0009-0002-8807-1059],  
В. Корнєєв [ORCID: 0009-0005-8784-2271], О. Яремко [SCOPUS ID: 24484282800]

Національний університет «Львівська політехніка» вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Відповідальний за рукопис: І. Берневек (e-mail: ivan.a.bernevek@lpnu.ua).

(Подано 14 червня 2024)

Проаналізовано основні перспективи групового використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), встановлено проблематику та запропоновано етапи її вирішення. Проаналізовано базові алгоритми, які призначені для досягнення спільних та узгоджених дій всіх елементів системи інтегрованого управління групою БПЛА, та використовуються в більшості підходів для забезпечення стабільної взаємодії між компонентами системи. Проведено аналіз найбільш поширених математичних моделей для управління групами БПЛА, зокрема: модель згуртування Рейнольдса, модель поля штучного потенціалу та модель слідкування за лідером. Визначено особливості роботи даних моделей, спільні та відмінні особливості, переваги та недоліки. Базуючись на розглянутих моделях та базових алгоритмах взаємодії, запропоновано алгоритми роботи компонентів системи управління групою БПЛА, а також описано послідовність дій при взаємодії між компонентами системи. Розглянуто основні деталі алгоритмів управління групою БПЛА. Наведено основні аспекти взаємодії елементів системи, які включають повідомлення різних категорій, що використовуються на різних етапах роботи системи, зокрема: синхронізуючі повідомлення; загально-групові керуючі повідомлення, для управління групою як єдиним цілим; повідомлення для корегування польоту конкретного БПЛА; повідомлення передачі статистичної інформації для корегування польоту; повідомлення запуску та координації виконання завдання конкретним БПЛА. Описано використання спільних повідомлень для управління групою, яке дозволяє розвантажити канал передачі, адже розрахунок траєкторій польоту здійснюється кожним БПЛА індивідуально, по заздалегідь визначених критеріях. Описано основні етапи роботи системи, особливості їх виконання, черговість передачі повідомлень в кожному етапі, а також базові деталі роботи деяких компонентів системи. Наведено блок-схеми для відображення процесу роботи системи на різних етапах польоту, з детальним описом кроків роботи системи. Описано процес збору статистичних даних з БПЛА для динамічного коригування польоту групи.

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, організація груп БПЛА, взаємодія БПЛА в групі

### 1. Вступ

З кожним роком сфера застосування безпілотних літальних апаратів розширюється. Також змінюються вимоги до їх застосування і зростає складність покладених на них завдань. Якщо раніше для виконання певного завдання було цілком достатньо одного безпілотника, то зараз реальність диктує нові умови, які вимагають комплексного підходу для виконання завдання. Комплексний підхід може включати такі компоненти як розширений комплекс керування, використання захищеного каналу(каналів) передачі, використання різних систем позиціонування, автоматичне пілотування а також групове використання БПЛА.

Саме групове використання БПЛА в порівнянні з поодинокими дає можливість значно покращити якість виконання завдань, за рахунок можливості виконання різних функцій різними БПЛА, охоплення групою БПЛА більших територій а також спроможність виконання завдання в разі втрати частини БПЛА.

Групове використання БПЛА може бути ефективним в таких областях як проведення моніторингу надземної, надводної території за мінімальний час, кліматичний контроль, динамічне розширення зони дії засобів зв'язку, картографія, обробка полів в сільському господарстві та інші[1].

Групове застосування БПЛА вимагає комплексного вирішення достатньо складної організаційно-технічної проблеми, яка включає в себе:

- аналіз математичних моделей керування групами БПЛА
- розробка методів організації і виконання групових польотів
- розробка методів інтегрованого управління групами БПЛА
- забезпечення зв'язку між БПЛА та синхронізація
- розробка методик розрахунку необхідної чисельності груп БПЛА при проведенні різних операцій

Можливості вирішення вищевказаних проблем розглянемо в цій статті.

## 2. Архітектура групи БПЛА

Ефективність використання групи БПЛА ґрунтується на гіпотезі про простоту поведінки, згідно з якою будь-яка достатньо складна поведінка складається з сукупності простих поведінкових актів (їх сумісна реалізація та найпростіша взаємодія призводять у результаті до складних поведінкових процесів), та гіпотезі про перевагу колективної поведінки над індивідуальними діями, згідно з якою дії колективу сутностей не є лише сумою індивідуальних дій, а утворюють нову якість[2].

Існує багато теорій реалізації сумісної роботи БПЛА. Аналіз цих теорій з метою оцінювання придатності для вирішення проблеми реалізації групової роботи групи БПЛА може бути предметом окремого дослідження.

Розглянемо базові алгоритми організації які використовуються в більшості підходів для забезпечення спільних узгоджених дій групи БПЛА[2]:

- Алгоритм самовиявлення передбачає отримання БПЛА інформації про інші БПЛА, їх ролі, координати, вектор руху, швидкість, відстані до них та інше. Наповнення інформації для самовиявлення визначається на етапі розробки і може розширюватись за необхідності. Метою використання цього алгоритму є формування зв'язної групи БПЛА.
- Алгоритм ідентифікації передбачає присвоєння кожному БПЛА групи унікального ідентифікатора. Даний ідентифікатор використовуватиметься для ідентифікації БПЛА в групі, а також в якості адреси, для надсилання команд(повідомлень) до конкретного БПЛА.
- Алгоритм узгодження передбачає погодження деякої однакової величини усіма БПЛА (прискорення, швидкість руху, висота, кути повороту, відстань між БПЛА, дальність польоту, та інше), тобто перехід від набору потенційно різних величин до однієї величини для всіх БПЛА.
- Алгоритм впорядкування в просторі передбачає можливість цілеспрямовано управляти розміщенням конкретних БПЛА у просторі, з урахуванням змін чисельності групи. Також цей алгоритм використовують для впорядкування, уникнення зіткнень з іншими БПЛА групи, групового оминання перешкод, зміні форми групи при проходженні складних ділянок місцевості а також відокремлення конкретних БПЛА групи для виконання функцій ретранслятора, чи виконання спецзавдань.
- Алгоритм синхронізації групи передбачає обмін синхронізуючою інформацією, для виконання маневрів БПЛА в реальному часі. Алгоритм передбачає отримання кожним БПЛА групи поведінкових інструкцій та синхронізуючих сигналів, згідно яких ці інструкції будуть виконуватись. Також алгоритм передбачає зворотній зв'язок з БПЛА про точність виконання інструкцій і у випадку запізнь, група коректує свої дії.

Використання наведених алгоритмів дає змогу групі БПЛА здійснювати спільні та узгоджені дії. Для організації взаємодії між БПЛА пропонується метод, згідно якого між комплексом керування і групою БПЛА передається базова інформація керування групою, як одним об'єктом. Вся інша координація між БПЛА відбуватиметься відповідно до вищенаведених алгоритмів.

### 3. Математичні моделі для керування групою БПЛА

Окрім базових алгоритмів організації для управління групою БПЛА необхідно також обрати стійку математичну модель для опису складної динаміки взаємодії деякої кількості БПЛА. Розглянемо найбільш поширені моделі групового управління БПЛА:

#### 1. Модель згуртування Рейнольдса

Ця біоінспірована модель ґрунтується на колективній поведінці, що спостерігається у зграях птахів або косяках риб. Вона описує три простих правила, які керують рухом кожного окремого БПЛА у групі:

- Відділення: Зберігати мінімальну відстань від сусідів, щоб уникнути зіткнень.
- Вирівнювання: Коригувати курс, щоб відповідати середньому курсу сусідів.
- Згуртування: Рухатися до центру мас сусідів.

Ці правила можна перетворити на математичні рівняння, які описують бажане прискорення кожного БПЛА. Отримана модель відносно проста у реалізації та може генерувати реалістичну поведінку згуртування.

$$u_i = w_s \sum (p_j - p_i) + w_a \sum (v_j - v_i) + w_c \sum \left( \frac{c_j - c_i}{|c_j - c_i|^2} \right), \quad (1)$$

де:  $u_i$  - бажане прискорення БПЛА;  $p_i$  - положення БПЛА  $i$ ;  $p_j$  - положення сусіда  $j$ ;  $v_i$  - швидкість БПЛА  $i$ ;  $v_j$  - швидкість сусіда  $j$ ;  $c_j$  та  $c_i$  - центри мас сусідів;  $w_s$ ,  $w_a$ ,  $w_c$  - вагові коефіцієнти, які визначають відносну важливість поділу, вирівнювання та згуртування, відповідно.

#### 2. Модель поля штучного потенціалу (APF)

Цей метод використовує штучні поля потенціалу для керування рухом БПЛА. Приваблює поля потенціалу створюються навколо цільових об'єктів, тоді як відштовхуючі поля потенціалу створюються навколо перешкод та інших БПЛА, щоб запобігти зіткненням. Загальна сила, що діє на БПЛА, розраховується як сума сил з усіх цих полів потенціалу.

Рівняння для приваблюючого поля потенціалу:

$$u_{att}(x) = 0.5 * k_{att} * (d_{goal} - |x - x_{goal}|)^2, \quad (2)$$

де  $u_{att}(x)$  - притягуючий потенціал у точці  $x$ ,  $k_{att}$  - коефіцієнт притягання,  $d_{goal}$  - бажана відстань до мети,  $x_{goal}$  - положення мети.

Рівняння для відштовхуючого поля потенціалу:

$$u_{rep}(x) = 0.5 k_{rep} \left( \frac{1}{|x - x_{obj}|} - \frac{1}{d_{safe}} \right)^2, \quad (3)$$

де  $u_{rep}(x)$  - відштовхуючий потенціал у точці  $x$ ,  $k_{rep}$  - коефіцієнт відштовхування,  $d_{safe}$  - мінімальна безпечна відстань,  $x_{obj}$  - положення перешкоди або іншого БПЛА

Загальне поле потенціалу:

$$u_{tot}(x) = u_{att}(x) + \sum u_{rep}(x) \quad (4)$$

#### 3. Модель слідкування за лідером.

Модель слідкування за лідером базується на ідеї, що один або кілька агентів (БПЛА) визначені як лідери, і решта агентів (наслідувачі) наслідують їхні рухи. Це забезпечує спрощене управління групою, дозволяючи контролювати загальний напрямок руху всієї групи через керування лідерами. Контрольний алгоритм для наслідувачів враховує відстань до лідера та коригує їх рух, щоб підтримувати цю відстань, забезпечуючи координацію та уникнення перешкод. Особливість локального зв'язку полягає в обмеженні взаємодій БПЛА виключно з найближчим оточенням, що значно знижує вимоги до передачі даних і спрощує управління роєм у складних умовах.

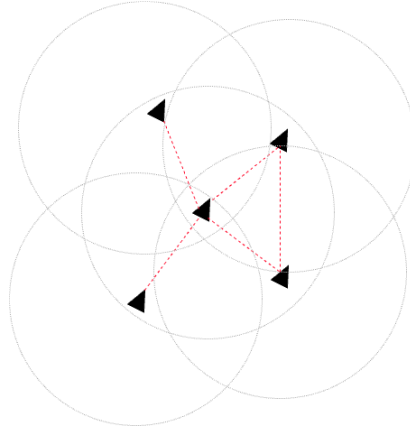


Рис. 1 Приклад локального зв'язку, реалізованого контрольним алгоритмом

На рис. 1 зображено приклад локального зв'язку БПЛА, реалізованого контрольним алгоритмом. Пунктирною лінією позначено зв'язаність БПЛА один з одним. Колами відмічено максимальний радіус зв'язку. Використовуючи локальний зв'язок між БПЛА, комунікація обмежується границею кожного БПЛА, через що деякі БПЛА можуть не комунікувати з іншими в групі. Проте початкові умови налаштовано так, що кожен БПЛА знаходиться у діапазоні зв'язку принаймні з одним із БПЛА, і всі БПЛА спочатку є «шляхово з'єднані», що означає, що будь-які два елементи у групі пов'язані через проміжних агентів.

Алгоритм управління слідкування за лідером отримується за допомогою наслідувача, модифіковано таким чином щоб між наслідувачем та лідером був сильніший зв'язок, наведено в рівнянні (5).

$$u_k^{follower} = c(|l(k)k|, 0, w) l_c l(k)k + \sum_{j \neq k, l(k)} c(|r_{jk}|, 0, w) u_{jk}, \quad (5)$$

де:  $u_k^{follower}$  – сигнал управління для наслідувача  $k$ ,  $l_c$  – константа зчеплення, яка визначає силу впливу лідера на наслідувачів,  $l(k)$  – індекс найближчого наслідувача до лідера,  $c(|l(k)k|, 0, w)$  – функція обмеження, активується, якщо відстань менше  $w$ ,  $u_{jk}$  – сигнал управління від елемента  $j$  до елемента  $k$ .

Ця формула дозволяє наслідувачам адаптуватися до поведінки лідера та реагувати на дії інших агентів у локальному радіусі, підтримуючи координацію і зберігаючи загальний напрямок руху рою.

Формула, яка описує управління поведінкою лідера в даній моделі:

$$u_k^{leader} = S_k, \quad (6)$$

де:  $S_k$  – експліцитна програма управління, яка може бути задана як траєкторія з динамічної системи.

Модель слідкування за лідером з локальним зв'язком має декілька потенційних недоліків:

Обмежена інформація: Агенти реагують лише на інформацію від найближчих сусідів, що може призвести до неповної або неточної картини загальної ситуації у групі.

Залежність від лідера: Якщо лідер вийде з ладу або зробить помилку, це може негативно вплинути на всю групу.

Масштабування: Локальний зв'язок може не бути ефективним у великих або дуже розподілених групах, оскільки інформація має поширюватися крізь багатьох посередників.

Відновлення після роз'єднань: У разі фізичного чи комунікаційного роз'єднання між агентами, група може не мати механізмів для швидкого відновлення зв'язків [8]

Це лише декілька прикладів математичних моделей, які можуть бути використані для управління групою БПЛА. Вибір моделі буде залежати від конкретного застосування, типів та конструктивних особливостей БПЛА та бажаної поведінки групи. Комбінування різних моделей дасть змогу збільшити переваги і зменшити недоліки кінцевої системи. Для спрощення розуміння, можна сказати, що робота більшості моделей ґрунтується на польоті за маршрутом з обминанням статичних (рельєф) та динамічних (сусідні БПЛА) перешкод. Базуючись на описаних моделях та базових алгоритмах взаємодії, пропонуються алгоритми роботи компонентів системи управління групою БПЛА, а також послідовність дій при взаємодії між компонентами системи.

#### 4. Інтегроване управління групою БПЛА

Взаємодія з групою БПЛА полягає в передаванні певної інформації між БПЛА, які входять до складу групи. Для спрощення опису процесу встановлення взаємодії, приймаємо, що встановлення каналу зв'язку, та комунікація між БПЛА відбувається з використанням mesh мережі, вузлами якої є самі БПЛА. Повідомлення які передається до БПЛА можна умовно розділити на чотири категорії:

- синхронізуюча інформація
- повідомлення про переміщення групи (маршрутна інформація)
- повідомлення для конкретного БПЛА групи.
- статистична інформація від БПЛА до комплексу управління.
- повідомлення запуску та координації виконання завдання конкретним БПЛА

Розберемо кожну категорію окремо

Синхронізуюча інформація передається від комплексу управління до всіх БПЛА групи. Повідомлення містять точний час відправки, який використовується для розрахунку затримки при передачі. Дана затримка враховується кожним БПЛА при отриманні повідомлень на виконання маневрів.

Повідомлення про переміщення групи передбачає передачу маршрутної інформації, такої як координати наступних  $X$  точок проходу, розрахунковий час проходу кожної наступної точки, висота, швидкість, координати статичних перешкод, напрям та швидкість вітру. Враховуючи власне положення та отриману маршрутну інформацію, кожен БПЛА групи розраховує власну траєкторію польоту відповідно до заданої математичної моделі.

Повідомлення для конкретного БПЛА групи передбачає передачу інформації про місцезнаходження БПЛА в групі, інформацію про зміну позиції, траєкторію виходу на нову позицію, інформацію про виконання спеціальних функцій окремим(окремими) БПЛА, коректуючу інформацію для розрахунку траєкторій польотів, інформацію про розміщення інших БПЛА та інше.

Статистична інформація від БПЛА до комплексу управління передбачає передачу повідомлень, в яких БПЛА вказує власні параметри польоту, відхилення від маршруту, вплив зовнішніх чинників на політ та інше.

Повідомлення запуску та координації виконання завдання конкретним БПЛА включають передачу інформації про траєкторію польоту, періодичність комунікації з комплексом управління, перелік та час виконуваних дій(маневрів), способи повернення в групу та інше.

Управління групою БПЛА як єдиним об'єктом є достатньо складним та комплексним завданням, яке крім основного алгоритму інтегрованого управління також включає розробку алгоритмів роботи різних компонентів системи та встановлення зв'язку між компонентами. Базові алгоритми, які можуть використовуватись в груповому управлінні БПЛА, математичні моделі

управління та встановлення взаємодії між компонентами розглядалися в попередніх розділах, основний алгоритм інтегрованого управління розглянемо далі.

Важливу роль в управлінні групою БПЛА відіграють системи позиціонування (супутникові, інерційні або комбіновані). Їх важливість полягає в тому, що кожен БПЛА, для правильної взаємодії та запобігання зіткнень, має повідомити інші компоненти системи про своє місцезнаходження, а також має знати де знаходяться інші БПЛА. Також системи позиціонування використовуються для автоматичного пілотування БПЛА, що є основним елементом алгоритму інтегрованого управління. Передбачається, що кожен БПЛА обладнаний годинником, який синхронізується з комплексом управління перед початком польоту.

Алгоритм передбачає виконання трьох етапів:

- розгортання системи
- політ
- завершення польоту

Розгортання починається з реєстрації БПЛА в системі. Кожен БПЛА під'єднується до комплексу управління і йому присвоюється унікальний ідентифікатор, за яким БПЛА зможе приймати команди управління. Також здійснюється синхронізація часу БПЛА і комплексу управління. Після реєстрації всіх БПЛА в системі, оператором встановлюється нульова точка групи і визначається положення кожного БПЛА в групі. Кожен БПЛА отримує від комплексу управління координати нульової точки і координати розташування в групі відносно неї. Якщо розглядати групу БПЛА як сферу, то нульовою точкою групи буде центр сфери, а координати конкретного БПЛА - його зміщення відносно центру в певному напрямку. Крім самих координат, БПЛА отримує траєкторію виходу на позицію в групі. Після виходу на позицію в групі, БПЛА звітує про виконання маневру. Деталі підготовки до польоту наведені на рис.2.

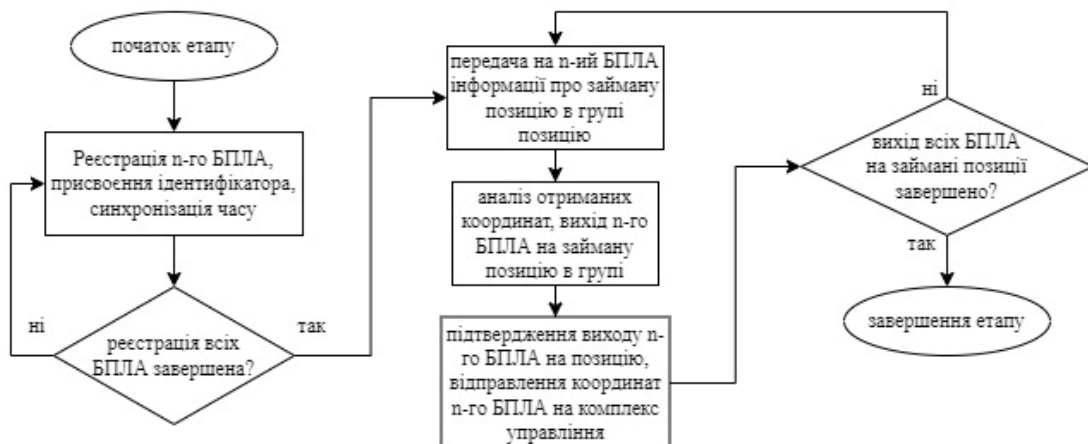


Рис. 2. Блок-схема процесу розгортання системи

Координація польоту групи БПЛА починається з того, що група отримує від комплексу управління список з  $X$  точок з координатами через які вона має пройти та параметри польоту, такі, як прискорення, швидкість, висота, швидкість набору висоти та інші.

Кожен БПЛА, на основі отриманого набору координат, інформації про розташування в групі та власних конструктивних особливостей, технічних характеристик та використовуваної математичної моделі, здійснює розрахунок траєкторії польоту. Група БПЛА отримує від комплексу управління синхронізуюче повідомлення, яке вказує про початок руху, група починає рух. Після проходження першої точки, комплекс управління відправляє оновлений набір координат для руху, в якому пройдені точки прибираються, а нові додаються в кінець списку. Процес циклічний, повторюється до кінця польоту.

Після проходження кожної точки, БПЛА відправляє на комплекс управління статистичну інформацію про політ та власні координати. У випадку відхилень параметрів польоту від норми, комплекс управління робить корекцію параметрів польоту для всіх, або для окремих БПЛА групи. В певних випадках може прийматись рішення про відкликання "відстаючого" БПЛА на базу. Деталі координації польоту наведені на рис.3.

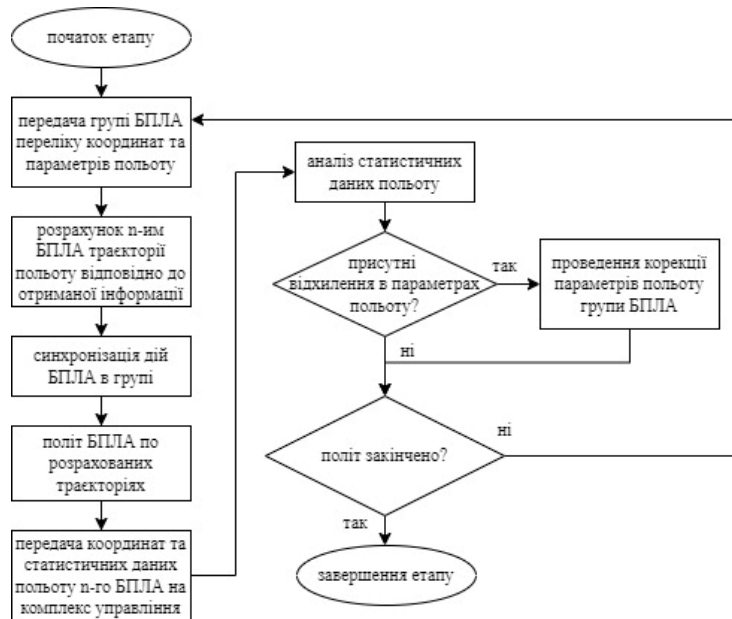


Рис. 3. Блок-схема процесу координації польоту групи БПЛА

Комплекс управління, відповідно до команд оператора, по чергово (або одночасно якщо дозволяє форма групи і рельєф місцевості), відправляє кожному БПЛА групи повідомлення про посадку, яке містить координати точки посадки і траєкторію заходу на посадку. Кожен БПЛА здійснює посадку і надсилає підтвердження на комплекс управління. Деталі завершення польоту наведені на рис.4.

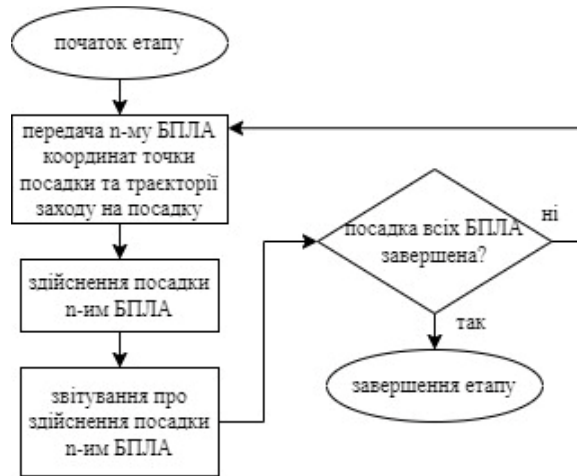


Рис. 4. Блок-схема етапу завершення польоту

Для економії часу і ресурсів етап посадки може розпочатись на останніх ітераціях етапу польоту. В цьому випадку, замість явно виражених команд зупинки групи і посадки, комплекс управління відправить БПЛА координати позиції і траєкторії руху. Проте такий підхід має підвищену складність реалізації, а у випадках використання великої кількості БПЛА - ризик зіткнень.

## Висновки

У статті наведено перспективність використання груп БПЛА, як інструменту для підвищення ефективності роботи БПЛА. Здійснено огляд базових математичних моделей для управління групами БПЛА та огляд базових алгоритмів для досягнення спільних та узгоджених дій всіх елементів групи БПЛА. Запропоновано алгоритм інтегрованого управління групою БПЛА на основі математичних моделей, базових алгоритмів групового управління БПЛА та запропонованих

аспектів взаємодії, який передбачає контроль положення та переміщення БПЛА в групі. Також алгоритм передбачає чітку синхронізацію всіх компонентів системи, що дає змогу одночасно виконувати маневри в межах групи. Використання спільних повідомлень для управління групою дозволяє розвантажити канал передачі, адже розрахунок траєкторій польоту здійснюється безпосередньо на БПЛА по заздалегідь визначених критеріях. Збір статистичних даних польоту БПЛА дозволяє вчасно реагувати на відхилення в групі і корегувати параметри польоту відповідно до обставин. В подальшому планується провести моделювання запропонованого алгоритму з використанням різних математичних моделей управління та порівняння ефективності їх роботи.

### Список використаних літературних джерел

- [1] V. Golemba, R. Melnikov (2018) "Organization of work for a group of drones", *Computer Systems and Networks*, 2018, no. 905, pp. 56-63. doi: 10.23939/csn2018.905.056
- [2] Hypothesis of simplicity, available at: <http://studopedia.org/3-67094.html> (Accessed 15 April 2024).
- [3] Eversham, J.D.; Ruiz, V.F. "Experimental analysis of the Reynolds flocking model", *Paladyn* 2011, no. 2, pp. 145-155. doi: 10.2478/s13230-012-0001-8
- [4] V. Erofeeva, Y. Ivanskiy, V. Kiyaev (2015) "Swarm control of dynamic objects based on multi-agent technologies", *Computer tools in education*, 2015, no. 6. pp. 34-42
- [5] Elkhan Sabziev (2021) "A control algorithm for joint flight of a group of drones", *Scientific Journal of Silesian University of Technology Series Transport*, 2021, no. 110, pp. 157-167. doi:10.20858/sjsutst.2021.110.13
- [6] Dung D. Nguyen, Daniel Rohacs1 (2021) "Air traffic management of drones integrated into the smart cities", 32nd congress of the International council of the Aeronautical sciences, available at: [https://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2020/data/papers/ICAS2020\\_0456\\_paper.pdf](https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_0456_paper.pdf) (Accessed 15 April 2024).
- [7] Chuhao Qin, Alexander Robins, Callum Lillywhite-Roake, Adam Pearce, Hritik Mehta, Scott James, Tsz Ho Wong, Evangelos Pournaras (2024) "M-SET: Multi-Drone Swarm Intelligence Experimentation with Collision Avoidance Realism", available at: <https://arxiv.org/html/2406.10916v1> (Accessed 23 June 2024).
- [8] Konrad Wojtowicz, Przemysław Wojciechowski (2023) "Synchronous Control of a Group of Flying Robots Following a Leader UAV in an Unfamiliar Environment", *Advanced Intelligent Control in Robots* 2023, no. 23, p. 740. doi: 10.3390/s23020740
- [9] O. Tymochko, A. Trystan, O. Matiushchenko, N. Shpak, Z. Dvulit (2022) "Method of controlling a group of unmanned aircraft for searching and destruction of objects using artificial intelligence elements", *Mathematical Modeling and Computing*, Vol. 9, no. 3, pp. 694-710. doi: 10.23939/mmc2022.03.694
- [10] D. S. Morgan, I. B. Schwartz. "Dynamic coordinated control laws in multiple agent models", 2005 US Naval Research Laboratory, pp. 7-10. doi: 10.23939/mmc2022.03.694
- [11] Guoqiang Hao, Qiang Lv, Zhen Huang, Huanlong Zhao, Wei Chen. "UAV Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method", *Aerospace* 2023, 10, 562. doi: 10.3390/aerospace10060562
- [12] Majeed, A.; Hwang, S.O. A "Multi-Objective Coverage Path Planning Algorithm for UAVs to Cover Spatially Distributed Regions in Urban Environments", *Aerospace* 2021, 8, 343. doi: 10.3390/aerospace8110343

## INVESTIGATION OF INTEGRATED CONTROL ALGORITHMS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE GROUPS

Ivan Bernevek, Oleh Holovko, Taras Rosa, Victor Kornieiev, Oleh Yaremko

Lviv Polytechnic National University, S. Bandery Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine

The main prospects for the group use of unmanned aerial vehicles (UAVs) were analyzed, the problems were identified, and the stages of its solution were proposed. The basic algorithms are analyzed, which are designed to achieve joint and coordinated actions of all elements of the system of integrated control of a group of UAVs, and are used in most approaches to ensure stable interaction between system components. The analysis of the most common mathematical models for controlling groups of UAVs was carried out, in particular: the Reynolds cohesion model, the artificial potential field model, and the leader-following model. The peculiarities of the operation of these models, common and distinctive



features, advantages and disadvantages are determined. Based on the considered models and basic interaction algorithms, the algorithms of the components of the UAV group control system are proposed, and the sequence of actions during the interaction between the system components is also described. The main details of UAV group control algorithms are considered. The main aspects of the interaction of the system elements are given, which include messages of various categories used at different stages of the system's operation, in particular: synchronizing messages; group-wide control messages for managing the group as a whole; messages for correcting the flight of a specific UAV; notification of the transfer of statistical information for flight correction; notification of the launch and coordination of the task execution by a specific UAV. The use of joint messages for group management is described, which allows you to relieve the transmission channel, because the flight trajectories are calculated by each UAV individually, according to predetermined criteria. The main stages of the system's operation, the peculiarities of their implementation, the sequence of message transmission in each stage, as well as the basic details of the operation of some system components are described. Block diagrams are provided to display the process of system operation at various stages of flight, with a detailed description of the steps of system operation. The process of collecting statistical data from UAVs for dynamic flight adjustment of the group is described.

**Keywords:** *unmanned aerial vehicles, organization of groups of UAVs, interaction of UAVs in a group*